ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕКОНОМІКИ, УПРАВЛІННЯ, ПРАВА ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ТЕХНОЛОГІЙ

Освітньо-професійна програма Інформаційні управляючі системи та технології

Спеціальність 126 Інформаційні системи та технології

Ступінь вищої освіти Магістр

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

________________Юрій УТКІН

«15» грудня 2022 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «**Моделювання та програмна реалізація аналітичного модуля інформаційної системи підтримки прийняття рішень**»

виконав здобувач вищої освіти денної форми навчання

Маруженко Володимир Миколайович

Керівник кваліфікаційної роботи,
доцент, к.ф.-м.н. Леонід ФЛЕГАНТОВ

Полтава – 2022 року

ЗМІСТ

ВСТУП

Дана робота присвячена проблематиці комп'ютерної підтримки процесу прийняття рішень.

Актуальність роботи. Швидке й безпомилкове прийняття обґрунтованих рішень в управлінській, підприємницькій діяльності, на виробництві, у приватному, особистому житті, є важливим, відповідальним та дуже часто складним інтелектуальним процесом. Особливо, це стосується тих випадків, коли наслідки помилкового рішення дуже складно або й неможливо виправити. Прикладами прийняття таких рішень можуть бути: вибір напрямку діяльності новоствореного підприємства, вибір партнерів, контрагентів у підприємницькій діяльності, прийняття на роботу співробітників за наявності кількох претендентів посаду, вибори депутатів, прийняття рішення щодо найкращого способу дій у військовій справі, прийняття рішення щодо акредитації, умовної акредитації або відмови в акредитації освітніх програм, вибір найкращого місця для відпочинку, обрання випускниками шкіл навчального закладу для здобуття вищої освіти, вибір здобувачами вищої освіти з переліку вибіркових дисциплін, рішення щодо придбання житла, автомобіля, комп'ютеру або смартфону з числа наявних на ринку пропозицій тощо. Дуже часто, такі рішення приймаються значною мірою інтуїтивно – на основі власного досвіду, існуючих стереотипів, з урахуванням думок інших осіб, за порадами експертів, консультантів, родичів, друзів, знайомих (які часто мають на увазі власні інтереси, які можуть не співпадати з інтересами та уподобаннями ОПР), під впливом реклами, або ж просто навмання.

З власної досвіду кожен може зрозуміти, що подібні ситуації вимагають певного, іноді тривалого, аналізу, який включає в себе ряд послідовних етапів: усвідомлення ситуації необхідності прийняття рішення, збирання інформації з щодо наявних альтернатив та їх характеристик, аналіз і порівняння, і, насамкінець, прийняття рішення – остаточний вибір однієї з наявних альтернатив (зауважимо, що відмова від прийняття рішення теж є альтернативою). Зрозуміло, що такий аналіз потребує значних розумових зусиль та часу, так що іноді рішення приймається із значним запізненням, або взагалі втрачається його актуальність.

Отже, прийняття рішення є складним інтелектуальним процесом вибору з кількох наявних альтернатив. Саме тому, процедура прийняття раціональних рішень потребує підтримки у формі використання інформаційних технологій, так само, як ми користуємось калькуляторами або іншими, більш досконалими засобами й технологіями, для виконання складних обчислень.

Яскравим прикладом існуючих програмних технологій підтримки прийняття рішень є стандартний функціонал провідних інтернет-магазинів, які пропонують можливість порівняння однотипних товарів за їх характеристиками. Також, пошукові системи, системи контекстної реклами, маркетплейси та інші вебсервіси можуть використовувати більш складні інформаційні технології – так звані рекомендаційні системи на базі штучного інтелекту, які, аналізуючи поведінку людини (наприклад, що і як довго вона переглядала в інтернеті, як часто зверталась до тієї чи іншої інформації тощо), пропонують або безпосередньо рекомендують їй ту чи іншу додаткову альтернативу. Однак, такий функціонал, насправді, не передбачає раціонального урахування уподобань особи, яка приймає рішення. Він має більш рекламний характер, а його справжня мета – спонукати споживача ознайомитись із якомога більшою кількістю наявних пропозицій. Як правило, у процесі такого ознайомлення користувачі дуже часто приймають не обґрунтоване, а емоційне рішення придбати більш дорогий товар. Обираючи інтуїтивно, згодом ми не можемо пояснити, чому саме зробили такий вибір. Вибір за допомогою рекомендаційних систем дозволяє обґрунтувати й пояснити вибір, але цей вибір, насправді, не завжди є оптимальним для ОПР.

Таким чином, з точки зору інтересів ОПР, потрібна така інформаційна система підтримки прийняття рішень, яка аналізує наявні альтернативи й надає рекомендації з урахуванням інтересів й уподобань саме тієї особи, яка приймає рішення. Це зумовлює актуальність теми даної роботи.

На противагу інтуїтивному вибору та вибору на основі рекомендацій, існують раціональні методи прийняття рішень, що ґрунтуються на математичних розрахунках. Головна ідея цих методів полягає в тому, що внаслідок певної математичної процедури, у більшості випадків ми можемо одержати числові оцінки всіх можливих варіантів вибору (альтернатив). В результаті, ми обираємо альтернативу з максимальною або мінімальною оцінкою, залежно від нашої мети і характеру самої оцінки. Одним з таких методів є метод аналізу ієрархій [53]. Прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій полягає у тому, що раціональний вибір з множини наявних альтернатив ґрунтується на усвідомленні особою, яка приймає рішення власних інтересів та уподобань, що можуть бути оцінені у числовому вимірі, і за допомогою певної процедури перетворені на числові оцінки альтернатив, згідно критеріїв визначених користувачем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана робота виконана за ініціативною темою, згідно методичних вказівок [65].

Мета роботи: представити сучасні методи математичного моделювання процесу прийняття раціональних рішень в умовах визначеності; дати математичне описання процесу прийняття рішень – побудувати математичну модель, що описує процес прийняття раціонального рішення шляхом обґрунтованого з довільної кількості альтернатив на основі довільної кількості критеріїв, визначених користувачем; створити комп'ютерну програму – аналітичний модуль, який може бути інтегрований до інформаційної системи підтримки прийняття рішень.

Завдання роботи:

− провести пошук і аналіз наукових джерел з питань моделювання, математичного моделювання процесу прийняття рішень;

− скласти алгоритм побудови математичної моделі процесу прийняття рішень в умовах визначеності, побудувати математичну модель;

− скласти комп'ютерну програму з використанням створеної моделі;

− випробувати роботу комп'ютерної програми, дати її економічну оцінку, сформулювати висновки.

Об'єктом дослідження у даній роботі є процес прийняття раціональних рішень.

Предмет дослідження: моделювання процесу прийняття рішень, побудова математичної моделі прийняття рішення в умовах визначеності та її програмна реалізація.

Методи наукових досліджень: теоретичні – аналіз, синтез, виокремлення основного, метод математичного моделювання, метод алгоритмізації; практичні – метод комп’ютерних розрахунків, методи програмування.

Інформаційна база. При виконанні кваліфікаційної роботи були використані: науково-технічна література, аналітичні джерела мережі інтернет, дані офіційної документації з UML, HTML, CSS, JavaScrit, JQuery, вітчизняні та зарубіжні стандарти тощо.

Елементи наукової новизни. На відміну від існуючих на практиці програмних технологій підтримки інтуїтивного прийняття рішень та рекомендаційних систем, запропоновано формальний алгоритм та його комп’ютерну реалізацію, що використовує математичну модель прийняття рішення в умовах визначеності на основі методу аналізу ієрархій, і дозволяє в інтерактивному режимі одержати числові оцінки довільної кількості альтернативних рішень. Завдяки цьому, набули подальшого розвитку теоретичні й практичні знання з побудови інформаційних систем підтримки прийняття рішень.

Основні результати роботи. На основі методу аналізу ієрархій побудована математична модель прийняття одноосібних рішень на основі довільної кількості критеріїв, визначених ОПР; розроблений алгоритм комп’ютерної реалізації даної моделі та створена комп’ютерна програма – аналітичний модуль ІСППР, що дозволяє автоматизувати ППР з урахуванням уподобань ОПР. Основними результатами роботи є:

- побудова математичної моделі процесу раціонального прийняття рішення;
- створення комп’ютерної програми для підтримки прийняття рішення.

Робота показує доцільність математичного описання процедури вибору за моделлю, що пропонується. Загалом встановлено, що дана модель дозволяє зробити обґрунтований (раціональний) вибір з кількох наявних альтернатив. Зроблено висновок про те, що процедура прийняття раціонального рішення за допомогою створеної комп’ютерної системи підтримки дозволяє більш свідомо й раціонально приймати відповідні рішення.

Практична значущість. Результати роботи можуть бути використані на практиці безпосередньо для прийняття рішень на основі критеріїв, визначених особисто користувачем, які відображають його власні інтереси й уподобання, наприклад, для раціонального вибору дисциплін здобувачами вищої освіти під час формування індивідуальної освітньої траєкторії; для проведення подальших досліджень у напрямку комп’ютерного моделювання процесу прийняття рішень; як додатковий матеріал з дисциплін «Лінійна алгебра та аналітична геометрія», «Прикладна математика», «Теорія прийняття рішень», «Методи програмування» та ін.

Апробація результатів дослідження. Результати роботи доповідались на IV Міжнародної науково-практичній конференції, що присвячена 50-ій річниці кафедри інформаційних систем та технологій. Полтава: ПДАУ, 2021 [66], а також на Щорічній міжвузівській студентській конференції ПДАУ 10 листопада 2022 р. [67, 68].

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Основний текст роботи викладений на 56 сторінках, містить 14 малюнків і 5 таблиць.

РОЗДІЛ 1
МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ

1.1 Основні категорії моделювання

Моделювання – процес відображення властивостей одного об'єкта (оригіналу) в іншому об'єкті (моделі). Це можуть бути об'єкти в цілому та (або) їх окремі сутності – процеси та явища. Явища, наприклад, поведінка тварини, стан погоди, розглядаються як складні процеси. В основу моделювання закладено процедуру формалізації – переклад властивостей об'єкта на мову понять предметної галузі, графічних об’єктів, алгоритмів та математики. Моделювання – це побудова (або вибір) і вивчення такого об’єкта будь-якої природи (моделі), що здатний замінити собою досліджуваний об’єкт (оригінал) і вивчення якого дає нову інформацію про досліджуваний об’єкт [59].

Модель відображає окремі особливості поведінки об’єкта-оригіналу, має деякі риси, ідентичні з оригіналом, і використовується для одержання такої інформації про оригінал, яку важко або неможливо одержати шляхом безпосереднього дослідження оригіналу.

Оригінал – об’єкт, певні властивості (аспекти) якого підлягають вивченню методом моделювання. У загальному випадку поняття оригіналу охоплює об’єкти (системи, підсистеми, елементи), як реально існуючі, так і такі, що проєктуються, а також явища, режими і процеси, які в них відбуваються. У визначенні оригіналу зустрічаються наступні терміни.

Система – сукупність компонентів, яка розглядається як єдине ціле й організована для розв’язання певних задач так, що два будь-які її компоненти є взаємозалежними – пов’язаними деяким відношенням. У системі можуть бути виділені підсистеми – відносно самостійні частини системи, які пов’язані функціонально між собою, а також елементи – компоненти системи, які приймаються за відповідної постановки задачі як неподільні.

Явище – сукупність процесів, які пов’язані із функціонуванням або зумовлені поведінкою системи й виявляються у вигляді змін стану або режимів цієї системи.

Режим – стан системи, який визначається різними процесами й залежить як від власних параметрів системи, так і від зовнішніх впливів. Відрізняють стаціонарні (усталені) і нестаціонарні (перехідні) режими. Стаціонарний режим – такий стан системи, за якого параметри режиму не змінюються в часі. В іншому випадку режим є нестаціонарним (перехідним).

Процес – закономірна послідовна зміна певного набору параметрів режиму, які називаються параметрами процесу. Система також характеризується своїми параметрами. Наприклад, при дослідженні механічних явищ параметрами процесів є сили, швидкості, прискорення, а параметрами системи – маси тіл, коефіцієнти тертя, в’язкості рідин тощо. Системи, у яких параметри є сталими на всьому інтервалі часу, протягом якого відбувається процес, що вивчається, називаються лінійними. Системи, у яких хоча б один параметр змінюється як функція іншого або кількох інших параметрів, називаються нелінійними.

Моделювання дає ймовірну інформацію про деякий фрагмент реальності. Після певних перевірок ця інформація може виявитися істинною чи хибною й вимагати побудови нових моделей. Поряд зі спостереженням, вимірюванням, експериментом та порівнянням, моделювання є одним із загальнонаукових методів. Його ефективність та універсальність зростають по мірі розвитку інформаційних технологій. З різних причин об'єкт дослідження може бути недоступний (занадто малий або великий, далеко розташований, дорогий, припинив існування тощо). Користь моделювання полягає в тому, що можна експериментувати не з самим об’єктом дослідження, а з його аналогом – моделлю, що певною мірою відображає основні властивості й поведінку об’єкту.

Об'єкт і модель перебувають у відношенні подібності, тобто модель за якимись ознаками має бути подібною до об’єкту, що вивчається. Це явище називають ізоморфізмом. Розрізняють три види подібності.

Перший вид – подібне масштабування. Приклади такої подібності: моделі автомобілів, літаків, кораблів споруд тощо.

Другий вид подібності – непряма подібність (математична аналогія). Наприклад, багато різних фізичних процесів переносу може бути описано рівняннями, які мають однаковий загальний вид [64]:

перенесення маси речовини – закон Фріка $j = -D\dfrac{dC}{dx}$, де D – коефіцієнт дифузії, C – концентрація речовини, x – поточна координата;

перенесення тепла – рівняння Фур'є $q = -\lambda\dfrac{dT}{dx}$, де q – тепловий потік, T – температура, λ – коефіцієнт теплопровідності;

перенесення електрики – закон Ома $i = -c\dfrac{du}{dx}$, де i – сила струму, c – характерна провідність, u – електричний потенціал.

Прикладом непрямої подібності також є подібність електричних та механічних явищ, зокрема: період коливань фізичного маятника $T = 2\pi\sqrt{l/g}$; пружинного маятника $T = 2\pi\sqrt{m/k}$; електричного коливального контуру $T = 2\pi\sqrt{LC}$.

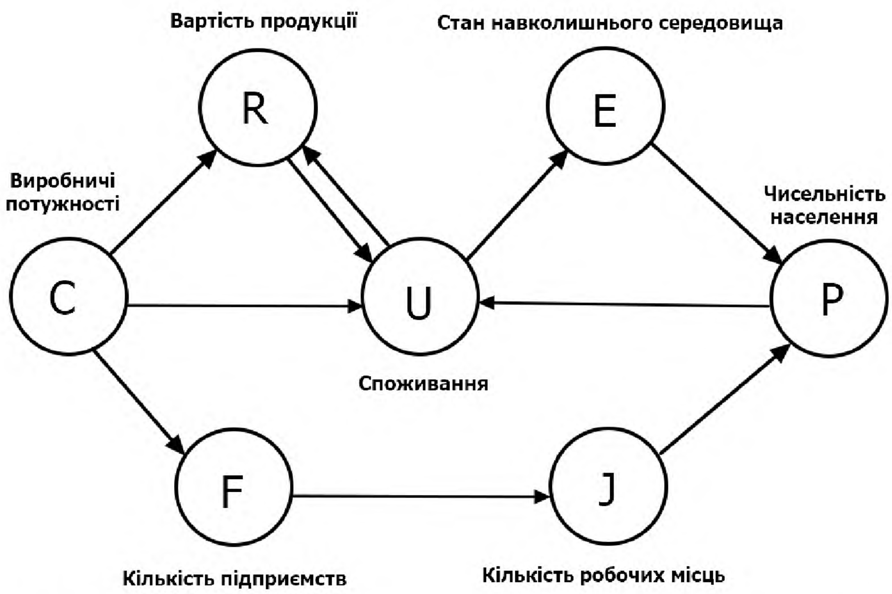

Рис.1. Когнітівна модель споживання промислової продукції [54].

Третій вид подібності – умовна подібність. Прикладами є географічні карти, креслення споруд, будівель, структурні схеми (моделі системного аналізу), когнітивні моделі (рис. 1). При цьому зовні схожість об'єкта та моделі може не зберігатися.

Об’єкт моделювання та модель можуть бути матеріальними чи абстрактними. Наприклад, макет літака – матеріальна модель. Схема інформаційної мережі або технологічної лінії виробництва – абстрактні моделі. Моделі також можуть бути абстракціями інших моделей, як, наприклад, спадкування (створення одних класів з урахуванням інших) в об'єктно-орієнтованому програмуванні.

Адекватність моделей. Вигляд та властивості моделі визначаються цілями дослідника. У моделі відображаються властивості об’єкта, що відповідають цим цілям. У першу чергу у моделі повинні бути відображені суттєві властивості оригіналу.

Знати всі властивості предмету дослідження не можна. Але це не означає, що метод моделювання є ненадійним. Згідно принципу множинності моделей, можна будувати різні моделі, що дозволяє розглядати об'єкт моделювання з різних позицій [59, 62].

Існують спеціальні процедури перевірки, чи є модель достатньо точним описанням реальності, тобто, чи адекватна модель об’єкту моделювання. Верифікація – перевірка достовірності моделі – дозволяє визначати, чи правильно концептуальна модель (модельні припущення) перетворена на комп'ютерну програму. Валідація – дозволяє встановити, чи є модель точним описанням об’єкту для конкретних цілей дослідження. Якщо модель визнана адекватною, то її можна використовувати для прийняття рішень щодо об’єкту, який вона представляє.

Підсумковий результат моделювання залежить від особистості розробника. Моделювання передбачає творчий підхід до об’єкта та цілей дослідження, потребує розвиненої уяви, вміння аналізувати та робити узагальнення, навичок нестандартного мислення.

Системний підхід у моделюванні. Матеріальні сутності – це набори взаємозалежних і взаємодіючих елементів, що утворюють системи різного рівня складності. Топологічна складність визначається кількістю елементів та зв'язків у системі. Функціональна складність характеризується процесами (поведінкою) системи та її елементів.

На нижніх рівнях складності визначальними є індивідуальна поведінка, фіксовані фізичні зв'язки, точні розміри, відстані, швидкості, часи. На верхніх рівнях суттєвими є глобальні причинні залежності, тенденції, сценарії, динаміка потоків, вплив зворотних зв'язків та навколишнього середовища, моделювання якого може бути окремим завданням.

Систему характеризують стани та особливості їх зміни. За кількістю станів система може бути статичною або динамічною. Динамічні системи, у свою чергу, поділяються: по типу станів – з дискретними та неперервними станами; за умовами переходів зі стану до стану – детерміновані та ймовірнісні (стохастичні); за часом переходу станів – з дискретним або неперервним часом. На основі визначення типу системи приймається рішення, у межах якої типової математичної схеми будуватиметься модель [59]:

Стани	Переходи	
	Детерміновані	Стохастичні
Неперервні	D-схеми D (dynamic) – моделі виду $dx/dt = f(x)$	Q-схеми Q (queuing) – моделі систем масового обслуговування
Дискретні	F-схеми F (finite automata) – скінченні автомати	P-схеми P (probabilistic automata) – ймовірнісні автомати

Для реалізації відповідної математичної схеми можливе застосування двох основних методів.

Аналітичне (математичне) моделювання. Передбачає використання алгебраїчних, диференціальних, інтегральних рівнянь, що зв'язують параметри моделі. Рівняння доповнюються системою обмежень. Аналітичні розв’язки моделі шукають, якщо параметрів небагато і система має лінійну поведінку. У більш складних випадках для відшукання розв'язків застосовують наближені чисельні методи [62]. Головною перешкодою у реалізації аналітичного методу може бути повна або часткова відсутність формул зв'язків.

Найдоступнішими програмними інструментами аналітичного моделювання є Excel [62], Matcad [61] та ін. [63]. Можливості Excel для створення моделей забезпечуються наявністю інструментів аналізу, значною кількістю математичних функцій, реалізацією чисельних методів, вбудованою підтримкою Visual Basic for Applications. Імітаційний потенціал Excel обмежений, побудова моделей динамічних систем становить певні труднощі [69].

Імітаційне моделювання. Тут математична модель відтворює алгоритм (логіку) функціонування досліджуваної системи у часі при різних поєднаннях значень параметрів системи та навколишнього середовища.

У роботі [59] наведена одна з можливих класифікацій методів моделювання, представлена на схемі (рис. 2).

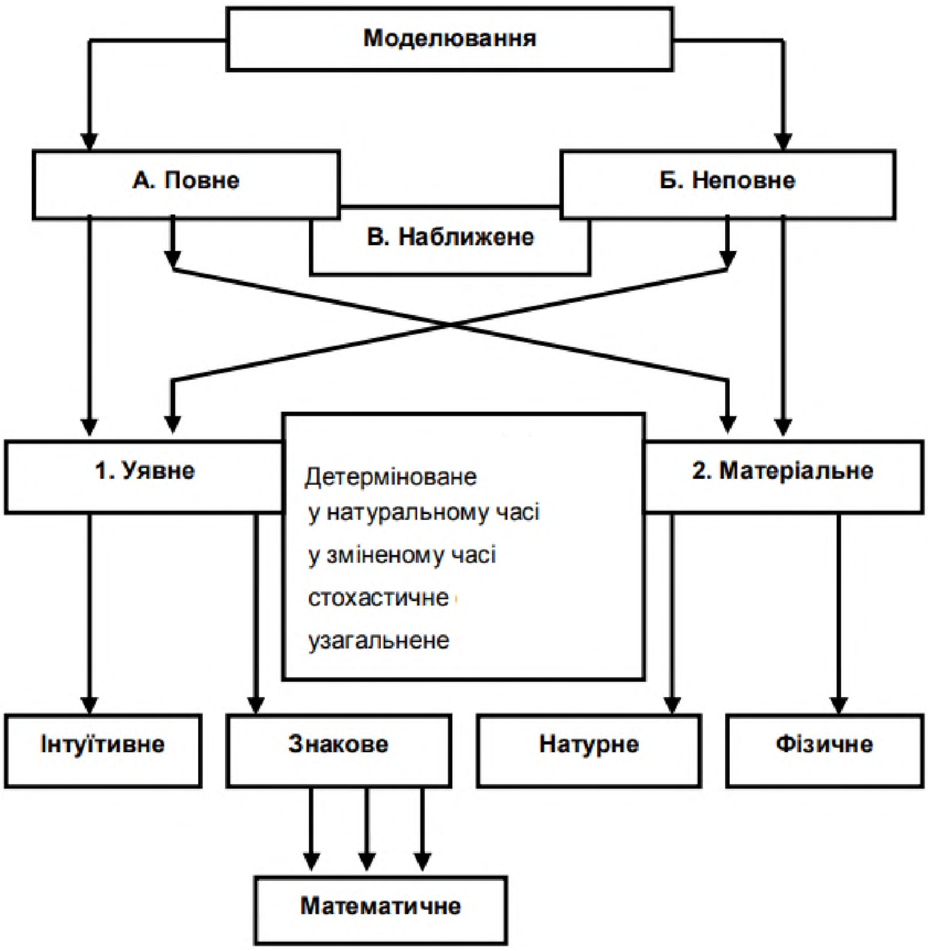

Рис. 2. Класифікація методів моделювання [59].

Наведене вище визначення моделі дозволяє сформулювати вимоги щодо методів моделювання [59]:

1. Методи моделювання мають наділяти модель здатністю відображати властивості реально існуючого об’єкта або об’єкта, що проєктується.

2. Методи моделювання мають базуватися на певних правилах, які дозволяють встановити взаємооднозначну відповідність між моделлю й оригіналом.

3. Методи моделювання мають забезпечувати можливість створення моделі, яка була б достатньо простою, й водночас достатньо повно й достовірно відображала ті властивості оригіналу, які є суттєвими в даному дослідженні.

1.2 Графічне моделювання

Графічне моделювання – окремий вид знакового моделювання, оснований на представленні моделей графічними засобами – у вигляді малюнків, схем, графіків, діаграм. Для описання процесів, наприклад, таких, як процес прийняття рішення, найчастіше використовують спеціальні UML-діаграми [4].

UML (Unified Modeling Language – уніфікована мова моделювання) [2] – графічна мова, що описує об'єкт у вигляді діаграм. Цей спосіб підходить для широкого класу програмних систем, що проєктуються, різних областей застосування, розмірів проєктів тощо [1].

У розробці програмного забезпечення UML використовують для комунікації всередині команди розробників та для спілкування із замовником. Основні випадки використання UML: проєктування ІС – UML-діаграми використовують при моделюванні архітектури великих проєктів, щоб зібрати всі деталі й намалювати каркас (схему) програми, по якій згодом будується програмний код; реверс-інжиніринг – зворотна побудова, створення UML-моделі з існуючого коду програми, застосовується, наприклад, у проєктах підтримки програмного забезпечення, де є написаний код, але документація неповна чи відсутня;

документування ІС – інформацію з UML-моделей можна використати, щоб згенерувати документацію проєкту, у разі її відсутності.

Для створення UML-діаграм використовують чотири основні типи графічних елементів: фігури, лінії, значки, надписи. Ці елементи залежать від виду та типу UML-діаграми [5].

В UML виділяють три види діаграм, які поділяються на типи: чотири з них описують статичну структуру додатку (структурні діаграми); п’ять типів, які описують поведінкові аспекти системи (поведінкові діаграми); три типи, що описують фізичні аспекти функціонування системи (діаграми реалізації) [6, 7].

Основні типи UML-діаграм [8, 9]: діаграма прецедентів (Use-case diagram); діаграма класів (Class diagram); діаграма активностей (Activity diagram); діаграма послідовності (Sequence diagram); діаграма розгортання (Deployment diagram); діаграма співробітництва (Collaboration diagram); діаграма об'єктів (Object diagram); діаграма станів (Statechart diagram). У даній роботі для описання алгоритму роботи аналітичного модуля інформаційної системи підтримки прийняття рішень використовується UML-діаграма послідовності (Sequence diagram).

UML-діаграми можна будувати вручну, але існують численні програмні технології та інструменти, зокрема, такі, як [10]: Diagrams.net (блок-схеми алгоритмів, діаграми сутність-зв'язок, UML-діаграми) [11]; Visual Paradigm Online [12]; Graphviz [13]; Graphviz Visual Editor [14]; Edotor Online Graphviz Editor [15]; Miro UML diagram tool [16]; Creately Create UML Diagrams [17]; Lucidchart UML diagram tool [18]; Visual Paradigm Online Free Edition [19]; StarUML – a sophisticated software modeler for agile and concise modeling [20] та ін. У даній роботі для побудови UML-діаграми процесу прийняття рішення був використаний вільний інструментарій вебсервісу Diagrams.net.

1.3 Математичне моделювання

Математична модель – це сукупність математичних співвідношень, які пов'язують між собою параметри об'єкта, явища, системи [59].

Залежно від особливостей характеристик об'єкту і завдань моделювання для побудови математичних моделей використовується різноманітний математичний апарат: методи лінійної алгебри та аналітичної геометрії, диференціальне та інтегральне числення, диференціальні рівняння, методи теорії ймовірностей і математичної статистики, зокрема, методи теорії масового обслуговування та мереж Петрі (застосовуються, зокрема, для моделювання інформаційних систем) та ін. За цими ознаками математичні моделі поділяють на: статичній й динамічні, детерміновані й стохастичні. Також можливі їх комбінації.

Моделювання процесів прийняття рішень, не має свого специфічного математичного апарату. Залежно від ситуації прийняття рішення (в умовах визначеності, в умовах ризику та в умовах невизначеності), нормативна теорія прийняття рішень використовує переважно методи лінійної алгебри та методи теорії ймовірностей [52, 55, 58].

У математичному моделювання можна виділити такі основні етапи [59]:

1. Збирання інформації про об'єкт моделювання, складання переліку параметрів об'єкту моделювання, які мають увійти до математичної моделі;

2. Вивчення інформації про параметри моделі з метою визначити їх типові значення, як орієнтир для подальшого дослідження моделі, перевірки її адекватності, інтерпретації результатів моделювання;

3. Визначення типу та виду моделі (залежно від завдань моделювання;

4. Побудова моделі;

5. Перевірка адекватності моделі – її валідація та верифікація [56];

6. Використання моделі: проведення обчислювальних експериментів (зазвичай, за допомогою математичних комп'ютерних програм), аналіз та інтерпретація результатів моделювання.

На даний час для завдань математичного моделювання використовуються спеціалізовані математичні пакети, які можна умовно поділити на категорії: загального призначення; для інженерних розрахунків; спеціалізовані для виконання розрахунків за окремими галузями знань (фізика, хімія, механіка суцільних середовищ, електротехніка тощо); програмні засоби та технології статистичної обробки даних.

Серед найбільш поширених математичних програм, придатних для цілей моделювання, можна виділити наступні: GNU Octave [21] – вільна программа для математичних обчислень, що використовує сумісну з MATLAB мову високого рівня, надає інтерактивний командний інтерфейс для вирішення лінійних та нелінійних математичних завдань, а також проведення інших чисельних експериментів; Maple [22] – система комп'ютерної алгебри для вирішення широкого кола математичних задач, яка має потужний математичний механізм та зручний інтерфейс, який спрощує аналіз, дослідження, візуалізацію результатів; Mathcad [23] – система комп'ютерної алгебри з класу систем автоматизованого проєктування, орієнтована на підготовку інтерактивних документів з обчисленнями та візуальним супроводом, математичний пакет для інженерних розрахунків; MATLAB [24] – пакет прикладних програм для виконання складних технічних обчислень; Scilab [25] – пакет прикладних математичних програм, що надає програмне середовище для інженерних та наукових розрахунків, виконання складних інженерно-математичних завдань; містить багато математичних функцій для алгебраїчних та геометричних розрахунків, працює з 2D- та 3D-графікою, інтегралами, матрицями, поліномами, диференціальними рівняннями тощо, дозволяє створювати функції користувача різними мовами програмування, є альтернативою MATLAB; Wolfram Mathematica [26] – система комп'ютерної алгебри для наукових, інженерних, математичних розрахунків, найбільш повна система для технічних обчислень; WolframAlpha [27] – система обчислювального інтелекту, база математичних знань та алгоритмів, зручний вебсервіс для швидкого виконання складних математичних розрахунків, розробка компанії Wolfram [28]; R [29] – мова програмування для статистичної обробки даних та роботи з графікою, а також вільне програмне середовище з відкритим вихідним кодом, поширюється у рамках проєкту GNU [30]; SAS [31] – пакет статистичного програмного забезпечення для управління даними, розширеної аналітики, багатовимірного аналізу, бізнес-аналітики, кримінальних розслідувань та прогнозної аналітики; SHAZAM [32] – комплексне програмне забезпечення для економетрики, статистики та аналітики; SPSS Statistics [33] – комп'ютерна програма для статистичної обробки даних, один із лідерів ринку в галузі комерційних статистичних продуктів, призначених для проведення прикладних досліджень у суспільних науках; Statistica – програмний пакет для статистичного аналізу, що реалізує функції аналізу даних, управління даними, видобутку даних, візуалізації даних із залученням широкого спектру статистичних методів та використанням технології нейронних мереж.

Зауважимо, що у даному переліку відсутні спеціалізовані програмні засоби, призначені суто для вирішення завдань комп’ютерної підтримки прийняття рішень. Дані математичні програми можуть бути використані у різних випадках, як інструменти аналізу і моделювання для обґрунтування управлінських рішень. Однак, усі вони орієнтовані на вирішення дуже широкого кола завдань, у більшості практичних випадків їх функціонал є надлишковим, та потребує досить високої кваліфікації користувачів.

1.4 Імітаційне моделювання

Імітаційне моделювання – побудова комп'ютерних моделей та проведення експериментів з ними [60], – застосовується, коли об’єкт моделювання описується багатьма параметрами, залежності між якими не лінійні, має якісно різні стани (безперервні процеси перериваються дискретними переходами), складну траєкторію в часі (об'єкт еволюціонує), імовірнісну поведінку та зворотні зв'язки. Імітаційний підхід незамінний, коли необхідно супроводжувати модель анімаційною презентацією (симуляцією). Наприклад, при створенні віртуальних тренажерів, моделей руху транспорту та пішоходів.

До будь-якого об'єкта, як предмета імітаційного моделювання, можна поставити два завдання. Спочатку потрібно визначити, «із чого він зроблений». Ця процедура реалізується за допомогою системного аналізу. Будь-який об'єкт розглядається як «чорна скриня», що має входи і виходи. Потім проводиться декомпозиція системи: знаходяться всі її підсистеми та елементи, що належать їм, зв'язки між ними, вхідні та вихідні потоки тощо. Процес завершується побудовою структурної схеми моделі. Відповідно до вимоги ізоморфізму у структурній моделі домагаються якісної адекватності оригіналу.

Друге завдання – з'ясувати, як об'єкт працює – реалізується у кілька етапів:

1) будується функціональна, адекватна оригіналу модель, що описує алгоритм роботи системи;

2) створюється імітаційна модель, вид якої визначається особливостями функціонування системи та завданнями візуалізації;

3) плануються та проводяться модельні експерименти;

4) залежно від результатів експериментів приймаються рішення щодо внесення змін до моделі, пошуку додаткової інформації про систему, проведення нових випробувань;

5) формулюються висновки та рекомендації.

Незважаючи на широту поняття «імітаційне моделювання», існує певна спеціалізація його завдань. У зв'язку з цим виділяють окремі напрямки цього методу та відповідне їм програмне забезпечення [61, 62, 63]: моделювання динамічних систем (MATLAB [24], VisSim [34], LabVIEW [35], Easy5 [36]; дискретно-подійове моделювання (aGPSS [37], SYMULA [38], Arena [39], AutoMod [40], Enterprise Dynamics [41], FlexSim [42]); агентне моделювання (Net Logo [43], Swarm [44], Repast [45], ASCAPE [46]); системна динаміка (VenSim [47], PowerSim [48], iSink [49]); моделювання комп’ютерних мереж (ns-3 network simulator [50]).

Перелічені програмні засоби імітаційного моделювання мають як свої переваги, так і недоліки, до яких належать – вузька спрямованість, нелокалізований інтерфейс, не автономність моделей – прив'язка моделей до середовища розробки, значна вартість, і як наслідок цього – відсутність представницьких спільнот розробників. Окремо можна вказати на інструмент імітаційного моделювання AnyLogic [51], що має можливість реалізації всіх напрямків імітаційного моделювання в одній моделі.

Висновки до розділу 1

Моделювання є універсальним загальнонауковим методом, який можна використовувати для описання будь-яких процесів, зокрема, і для процесу прийняття рішень. Існують три основні методи моделювання: графічне моделювання, аналітичне (математичне) моделювання, імітаційне моделювання.

Для описання логіки взаємодії користувача із інформаційною системою підтримки прийняття рішень у даній роботі доцільно скористатись методом графічного UML-моделювання, побудувавши UML-діаграму послідовності (Sequence diagram), що спеціально призначена для подібних випадків.

Для описання розрахункового алгоритму числової оцінки альтернатив у процесі прийняття рішень в умовах визначеності доцільно використати метод математичного моделювання. З точки зору системного моделювання, враховуючи характерні особливості процесу прийняття рішень (дискретні стани, детерміновані переходи), аналітичне описання цього процесу можна реалізувати відповідно до типової F-схеми математичного моделювання, з використанням математичного апарату матриць та алгебраїчних багатовимірних векторів.

На даний час не існує доступних спеціалізованих програм підтримки прийняття рішень, достатньо простих у користуванні, які не вимагають високої кваліфікації користувачів. Таким чином, створення програмного засобу підтримки прийняття рішень, орієнтованого на пересічних користувачів є актуальним.

РОЗДІЛ 2
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

2.1 Теоретичні основи моделювання процесу прийняття рішень

2.1.1 Елементи теорії матриць і векторів

Розглянемо основні відомості з теорії матриць та алгебраїчних n-вимірних векторів, які будуть використані далі для побудови математичної моделі процесу прийняття рішень методом аналізу ієрархій [57].

Матрицею A розміру $m \times n$ називають прямокутну таблицю, що складається з m рядків та n стовпців:

$$A = \left(a_{ij}\right)_{m \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & a_{m3} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix},$$

де a_{ij} – елементи матриці (зазвичай, числа), які розташовані на перетині рядка з номером i та стовпця з номером j.

Матриця називається квадратною, якщо $m = n$. Тобто $A = \left(a_{ij}\right)_{n \times n}$ – квадратна матриця.

Над матрицями можна виконувати дії додавання, віднімання, множення матриці на число (скаляр), а також множення матриці на матрицю.

Сумою (різницею) матриць $A_{m \times n}$ і $B_{m \times n}$ є матриця $C_{m \times n} = A_{m \times n} \pm B_{m \times n}$, елементи якої обчислюються за правилом: $c_{ij} = a_{ij} \pm b_{ij}$. Додавання й віднімання можливе лише для матриць однакового розміру.

Добутком числа (скаляра) λ на матрицю $A_{m \times n}$ називається матриця $B_{m \times n} = \lambda A_{m \times n}$, елементи якої обчислюються за правилом: $b_{ij} = \lambda a_{ij}$. Множити на число можна матриці будь-якого розміру, при цьому отримуємо матрицю такого самого розміру. Операція множення матриці на число є переставною.

Добутком матриці $A_{m\times n}$ на матрицю $B_{n\times k}$ є матриця $C_{m\times k} = A_{m\times n}B_{n\times k}$, елементи якої обчислюються за правилом:

$$c_{ij} = a_{i1}b_{1j} + a_{i2}b_{2j} + a_{i3}b_{3j} + \ldots + a_{in}b_{nj} = \sum_{k=1}^{n} a_{ik}b_{kj} .$$

Множення можливе для матриць, коли кількість стовпців першої матриці $A_{m\times n}$ рівна кількості рядків другої матриці $B_{n\times k}$. Операція множення матриць не переставна.

Транспонування матриць – полягає у тому, що стовпці й рядки матриці міняються місцями, тобто рядки матриці замінюються її відповідними стовпцями й навпаки. Таким чином, одержуємо транспоновану матрицю:

$$A^T = \left(a_{ji}\right)_{n\times m} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & \ldots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \ldots & a_{m2} \\ a_{13} & a_{23} & \ldots & a_{m3} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{1n} & a_{2n} & \ldots & a_{mn} \end{pmatrix}.$$

Матриця-рядок складається лише з одного рядка:

$$A_{1\times n} = \left(a_{1j}\right)_{1\times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \ldots & a_{1n} \end{pmatrix}.$$

Матриця-стовпець складається лише з одного стовпця:

$$A_{m\times 1} = \left(a_{i1}\right)_{m\times 1} = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \ldots \\ a_{m1} \end{pmatrix}.$$

Алгебраїчний n-вимірний вектор (n-вектор) – упорядкована множина n чисел виду: $a = \left(a_1, a_2, a_3, \ldots, a_n\right)$. Такий вектор, залежно від контексту, можна розглядати, як числову матрицю-рядок або матрицю-стовпець, розміром, відповідно, $1\times n$ або $n\times 1$. Тому над арифметичними n-векторами a і b можна виконувати такі самі дії, як і з матрицями, а саме: додавання, віднімання, і множення вектора на число (скаляр), за тими самими правилами. Також, можна обчислювати скалярний добуток $a \cdot b$ двох n-векторів, результатом якого є скаляр (число): якщо $a = (a_1, a_2, a_3, ..., a_n)$ і $b = (b_1, b_2, b_3, ..., b_n)$, то

$$a \cdot b = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 + ... + a_n b_n = \sum_{i=1}^{n} a_i b_i \, .$$

2.1.2 Елементи математичної теорії прийняття рішень

У теорії прийняття рішень використовуються раціональні процедури вибору однієї з кількох наявних альтернатив. Якість обраного рішення залежить від якості даних, що використовуються для описання ситуації, у якій приймається рішення. З цієї точки зору, процес прийняття рішення може відбуватись за різних умов [52]:

1. Прийняття рішень в умовах визначеності, коли вихідні дані, на основі яких приймається рішення, відомі точно – їм можна приписати певні числові характеристики, що дозволяють порівняти альтернативні рішення одне з одним.

2. Прийняття рішень в умовах ризику, коли вихідні дані можна описати за допомогою ймовірнісних розподілів, тобто ці дані мають ймовірнісний характер – їм неможливо приписати певні числові характеристики, а лише заданий набір їх можливих значень, що реалізуються з деякою ймовірністю.

3. Прийняття рішень в умовах невизначеності, коли вихідним даним неможливо приписати відносні ваги (вагові коефіцієнти), які представляють степінь їх значимості в процесі прийняття рішень.

Отже, в умовах визначеності дані надійно визначені, в умовах невизначеності вони не визначені взагалі. Прийняття рішень в умовах ризику представляє «проміжний» випадок.

Прикладом прийняття рішень в умовах визначеності є моделі лінійного програмування. Однак, ці їх можна застосувати лише тоді, коли альтернативні рішення можна пов'язати між собою точними лінійними функціями [52].

У даній роботі використовується інший підхід до прийняття рішень у ситуаціях, коли, наприклад, для ідей, відчуттів, емоцій тощо визначаються певні кількісні показники, що забезпечують числову шкалу уподобань для можливих альтернативних рішень. Цей підхід має назву метод аналізу ієрархій [53]. Для кращого розуміння подальшого, проілюструємо його прикладами.

Приклад 1. ОПР Х має обрати одну з трьох альтернатив А1, А2, А3. Для обґрунтування вибору Х використовує два критерії К1 і К2. При цьому Х вважає, що критерій К1 у 5 разів важливіший, ніж К2.

Прийнявши сумарну оцінку (вагу) обох критеріїв за 100%, визначимо, що вага критерію К1 становить 83% (5/6), а вага К2, відповідно – 17% (1/6). Маючи інформацію стосовно альтернатив А1, А2, А3, особа Х на власний розсуд (виходячи з власних уподобань) оцінює кожну з них за обома критеріями К1 і К2 таким чином, як представлено у таблиці 1.

Таблиця 1. Оцінки альтернатив А1, А2, А3 за критеріями К1 і К2

Критерії вибору	Альтернативні рішення		
	А1	А2	А3
К1	54,5%	27,3%	18,2%
К2	12,9%	27,7%	59,4%

На підставі даних таблиці 1, Х обчислює загальну підсумкову оцінку для всіх трьох альтернатив – їх комбінований ваговий коефіцієнт (КВК):

КВК(А1)=0,83x0,545 + 0,17x0,129 = 0,4743

КВК(А2)=0,83x0,273 + 0,17x0,277 = 0,2737

КВК(А3)= 0,83x0,182 + 0,17x0,594 = 0,2520

Оскільки, альтернатива А1 має найбільший КВК=0,4743, то вона вважається найкращим вибором для Х.

Логічну структуру даної задачі представимо у вигляді ієрархічного дерева: у дужках показані оцінки (вагові коефіцієнти) критеріїв та альтернатив (рис. 3).

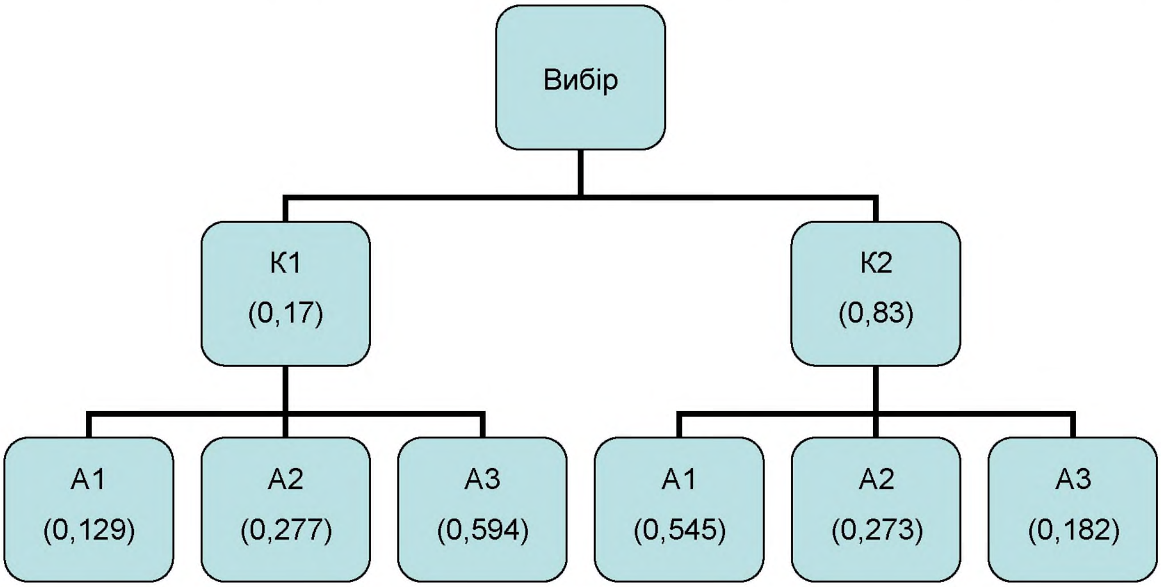

Рис. 3. Однорівнева ієрархічна структура прийняття рішення.

Розрахунки, що виконуютьсяі для обґрунтування рішення, можна подати у матричному вигляді [70].

Позначимо: $w=\begin{pmatrix} w_1 & w_2 \end{pmatrix}$ – 2-вимірний вектор (матриця-рядок) вагових коефіцієнтів (weighting factors) двох даних критеріїв К1 і К2, який відображає уподобання Х стосовно цих критеріїв: вагові коефіцієнти w_1 і w_2 показують, який критерій Х вважає більш вагомим), при цьому, $w_1 + w_2 = 1$;

$P=\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \end{pmatrix}$ – матриця оцінок альтернатив (елементи таблиці 1), визначених особою Х, для трьох альтернатив (кожній альтернативі відповідає свій стовпець матриці) за двома критеріями (рядки); сума кожного рядка = 1.

Тоді, матрицю комбінованих вагових коефіцієнтів (оцінок) альтернатив для задачі з одним ієрархічним рівнем знайдемо, як добуток $\Omega = w \cdot P$:

$$\Omega = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 p_{11} + w_2 p_{21} & w_1 p_{12} + w_2 p_{22} & w_1 p_{13} + w_2 p_{23} \end{pmatrix}$$

У даному прикладі: $w=\begin{pmatrix} 0.83 & 0.17 \end{pmatrix}$, $P=\begin{pmatrix} 0.545 & 0.273 & 0.182 \\ 0.129 & 0.277 & 0.594 \end{pmatrix}$.

Тоді,

$$\Omega=\begin{pmatrix}0.83 & 0.17\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}0.545 & 0.273 & 0.182\\ 0.129 & 0.277 & 0.594\end{pmatrix}=$$
$$=\begin{pmatrix}0.83\cdot0.545+0.17\cdot0.129 & 0.83\cdot0.273+0.17\cdot0.277 & 0.83\cdot0.182+0.17\cdot0.594\end{pmatrix}=$$
$$=\begin{pmatrix}0.4743 & 0.2737 & 0.2520\end{pmatrix}.$$

У загальному випадку, прийняття рішення методом аналізу ієрархій може мати декілька ієрархічних рівнів: на ієрархічній схемі задачі ці рівні розташовуються між вибором та альтернативами.

Приклад 2. Розглянемо випадок прийняття рішення з двома рівнями ієрархії. Така структура виникає, якщо спільне рішення має прийняти група з двох осіб. Припустимо, що дві особи X та Y мають спільно обрати одну з трьох альтернатив A1, A2, A3.

Логічна структура цієї задачі має два ієрархічних рівні: Вибір → Критерії ієрархії 1-го рівня → Критерії ієрархії 2-го рівня → Альтернативи → Оцінка альтернатив (рис. 4).

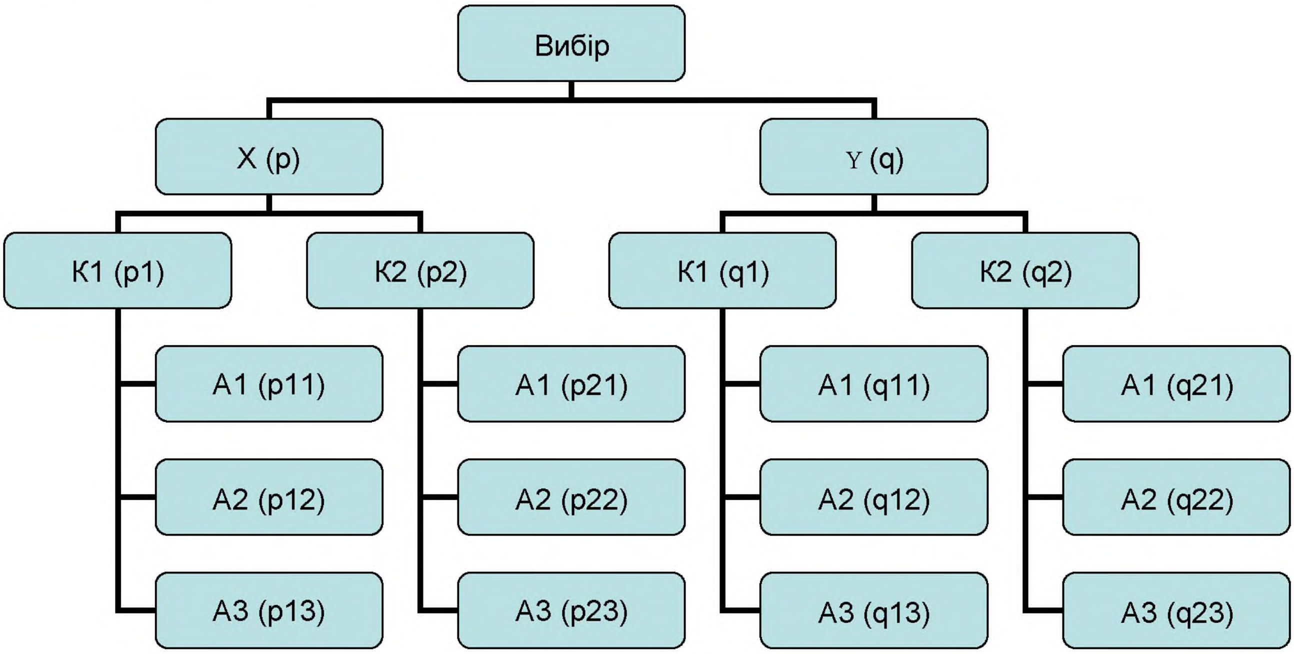

Рис. 4. Структурна схема задачі прийняття рішення з двома ієрархічними рівнями.

На першому рівні величини p і q, що утворюють вектор (p,q), це – вагові коефіцієнти, що приписуються точці зору X та Y стосовно процесу вибору (вони показують, чия точка зору більш вагома, і залежать, наприклад, від їх кваліфікації), при цьому, $p+q=1$.

Другий рівень використовує ваги (p_1, p_2) і (q_1, q_2), які відображають оцінку індивідуальних уподобань X та Y стосовно критеріїв K1 і K2 (ці ваги показують, який критерій більш важливий для кожного з них); при цьому, $p_1+p_2=1$, $q_1+q_2=1$.

Інша частина структури задачі прийняття рішення аналогічна попередньому:

$P=\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \end{pmatrix}$ – матриця порівняльних оцінок X трьох альтернатив за двома критеріями (відображає думку X); рядки – критерії, стовпці – альтернативи; сума кожного рядка рівна 1;

$Q=\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \end{pmatrix}$ – матриця порівняльних оцінок альтернатив, що відображає думку Y.

Згідно цієї схеми, індивідуальна оцінка альтернатив особами X та Y розраховується наступним чином. Комбіновані вагові коефіцієнти (оцінки) альтернатив, що враховують думку X, розраховуються так:

$$\Omega_1=\begin{pmatrix} p_1 & p_2 \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \end{pmatrix}=$$
$$=\begin{pmatrix} p_1p_{11}+p_2p_{21} & p_1p_{12}+p_2p_{22} & p_1p_{13}+p_2p_{23} \end{pmatrix}$$

Відповідно, оцінки альтернатив особою Y:

$$\Omega_2=\begin{pmatrix} q_1 & q_2 \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \end{pmatrix}=$$
$$=\begin{pmatrix} q_1q_{11}+q_2q_{21} & q_1q_{12}+q_2q_{22} & q_1q_{13}+q_2q_{23} \end{pmatrix}$$

Підсумкові оцінки трьох альтернатив з урахуванням ваги оцінки X та ваги оцінки Y будуть представлені 3-вектором (матрицею-рядком):

$$\Omega=p\Omega_1+q\Omega_2.$$

Аналогічним чином, можна побудувати розрахункову схему для обґрунтування прийняття спільного рішення групою, що складається з довільної кількості осіб (експертів) на основі довільної кількості критеріїв. У випадку, коли група експертів, що складається з n осіб, обирає рішення з k наявних альтернатив, використовуючи для обґрунтування вибору l критеріїв, підсумковий результат оцінювання буде представлений k-вектором виду:

$$\Omega = p_1\Omega_1 + p_2\Omega_2 + \ldots + p_n\Omega_n = \sum_{m=1}^{n} p_m\Omega_m \text{, де } \Omega_m = \left(p_{ij}\right)_{l\times k}.$$

1.2 Визначення вагових коефіцієнтів критеріїв та альтернатив

Головна складність розглянутого підходу полягає у визначенні вагових коефіцієнтів для оцінки альтернативних рішень. У наведених вище прикладах, ці коефіцієнти вважались заданими apriori. На практиці для їх визначення застосовується формальна процедура, яка полягає у наступному [52, 53, 71].

Якщо для прийняття рішення використовується n критеріїв на заданому рівні ієрархії, то спочатку ОПР має визначитись із вагою критеріїв вибору. Для цього використовується квадратна матриця парних порівнянь А розміру $n \times n$, яка відображає думку ОПР, щодо важливості різних критеріїв. Кожен рядок і стовпець цієї матриці відповідає одному із критеріїв. Парне порівняння критеріїв виконується таким чином, що критерій у рядку i $(i = \overline{1,n})$ оцінюється відносно кожного з критеріїв j $(j = \overline{1,n})$.

Елементи a_{ij} матриці парних порівнянь А є порівняльними оцінками важливості критеріїв, для оцінювання застосовують цілі числа від 1 до 9: $a_{ij} = 1$ означає, що i-й та j-й критерії однаково важливі, $a_{ij} = 5$ означає, що i-й критерій значно важливіший, ніж j-й , а $a_{ij} = 9$ показує, що i-й критерій надзвичайно важливіший, ніж критерій j. Проміжні значення між 1 та 9 інтерпретуються аналогічно.

Узгодженість (несуперечливість) порівняльних оцінок забезпечує умова $a_{ij}a_{ji}=1$, згідно якої, якщо $a_{ij}=k$, то $a_{ji}=1/k$. Крім того, у матриці А всі елементи $a_{ii}=1$, оскільки вони виражають оцінки критеріїв відносно самих себе.

Приклад 3. Розглянемо формальну процедуру парних порівнянь для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв на прикладі 1.

Спочатку побудуємо матрицю парних порівнянь критеріїв К1 і К2. Зауважимо, що діагональні елементи цієї матриці рівні 1. Оскільки, на думку Х К1 значно важливіший, ніж К2, то $a_{12}=5$, тоді, $a_{21}=1/5$.

Отже, для цього ієрархічного рівня матриця парних порівнянь має вид:

$$A=\begin{pmatrix} 1 & 5 \\ 1/5 & 1 \end{pmatrix}.$$

Тепер, знайдемо відносні ваги критеріїв К1 і К2:

а) елементи першого стовпця матриці А поділимо на їх суму 1+1/5=1.2, а другого на 5+1=6, одержимо нормалізовану матрицю:

$$N=\begin{pmatrix} 0.83 & 0.83 \\ 0.17 & 0.17 \end{pmatrix};$$

б) відносні ваги критеріїв К1 і К2 знайдемо, як середні значення елементів відповідних рядків нормалізованої матриці N:

$$w_1=(0.83+0.83)/2=0.83,\ w_2=(0.17+0.17)/2=0.17.$$

Таким чином, за формальною процедурою одержані ті самі ваги критеріїв, що були використані у прикладі 1.

Аналогічно, розрахуємо оцінки альтернатив А1, А2 і А3 за критеріями К1 і К2. Для цього використаємо дві матриці парних порівнянь, елементи яких визначені за шкалою 1… 9 на підставі міркувань Х.

Матриця парних порівнянь альтернатив А1, А2 і А3 за критерієм К1:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & 1 \end{pmatrix}, \text{ сума елементів стовпців} = (1.83, 1.67, 5.5).$$

Матриця парних порівнянь альтернатив А1, А2 і А3 за критерієм К2:

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} \\ 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 5 & 2 & 1 \end{pmatrix}, \text{ сума елементів стовпців} = (8, 3.5, 1.7).$$

Щоб одержати оцінки альтернатив за кожним із критеріїв, нормалізуємо матриці парних порівнянь, поділивши елементи стовпців на їх суму, і знайдемо середні значення по рядках. Одержимо:

$$N_1 = \begin{pmatrix} 0.545 & 0.545 & 0.545 \\ 0.273 & 0.273 & 0.273 \\ 0.182 & 0.182 & 0.182 \end{pmatrix}, \begin{matrix} p_{11} = (0.545 + 0.545 + 0.545)/3 = 0.545 \\ p_{12} = (0.273 + 0.273 + 0.273)/3 = 0.273 \\ p_{13} = (0.182 + 0.182 + 0.182)/3 = 0.182 \end{matrix}$$

$$N_2 = \begin{pmatrix} 0.125 & 0.143 & 0.118 \\ 0.250 & 0.286 & 0.294 \\ 0.625 & 0.571 & 0.588 \end{pmatrix}, \begin{matrix} p_{21} = (0.125 + 0.143 + 0.118)/3 = 0.129 \\ p_{22} = (0.250 + 0.286 + 0.294)/3 = 0.277 \\ p_{23} = (0.625 + 0.571 + 0.588)/3 = 0.594 \end{matrix}$$

Аналогічним чином можна отримати відносні ваги альтернативних рішень для Y.

1.3 Узгодженість матриць парних порівнянь

Якщо ОПР виявляє ідеальну узгодженість (несуперечливість думок) у визначенні елементів матриці парних порівнянь А, то стовпці нормалізованої матриці будуть N однаковими [52, 53, 72, 73]. Так було у матриць N і N_1, розглянутих вище. У той же час, стовпці матриці N_2 не є однаковими. Отже, матриці A і A_1 є узгодженими, а матриця A_2 такою не є.

Узгодженість матриці парних порівнянь означає несуперечливість думок (оцінок) ОПР [52, 72, 73]. З математичної точки зору узгодженість матриці A означає, що $a_{ij}a_{jk} = a_{ik}$ [52, 74]. Наприклад, у матриці A_1 маємо $a_{12}a_{23} = 2 \cdot \frac{3}{2} = 3 = a_{13}$. Властивість узгодженості вимагає лінійної залежності рядків (і стовпців) матриці парних порівнянь: в ідеалі, її рядки – колінеарні вектори, а стовпці – рівні вектори, тобто [57]: $\frac{a_{ij}}{a_{kj}} = const,\ j = \overline{1,n}$ – відповідні елементи рядків пропорційні.

Зауважимо, що стовпці будь-якої матриці парних порівнянь розмірності 2х2 будуть лінійно залежними, тобто така матриця завжди є узгодженою [52, 74].

Однак, не всі матриці порівняння є узгодженими. Оскільки вони будуються на основі людських міркувань, то природно очікувати в них деяку неузгодженість. Але ця неузгодженість не має виходити за деякі «допустимі» рамки.

Щоб з’ясувати, чи є неузгодженість матриці порівняння прийнятною використовують відповідну кількісну міру узгодженості [52, 53].

Показником узгодженості матриці порівняння A є коефіцієнт узгодженості:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \text{ де}$$

$CI = \frac{n_{\max} - n}{n-1}$ – коефіцієнт узгодженості матриці A;

$RI = \frac{1.98(n-2)}{n}$ – стохастичний коефіцієнт узгодженості матриці A.

Значення $n_{\max}$ обчислюється на основі матричного рівняння $Aw = n_{\max}w$, що еквівалентне системі лінійних алгебраїчних рівнянь [52, 57, 74].

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij}w_j = n_{\max}w_i,\ i = \overline{1,n}.$$

Оскільки $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$, то взявши суму від обох частин попереднього рівняння, одержимо: $\sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{n} a_{ij} w_j\right) = \sum_{i=1}^{n} n_{\max} w_i = n_{\max} \sum_{i=1}^{n} w_i = n_{\max}$. Тобто:

$$n_{\max} = \sum_{i=1}^{n}\left(\sum_{j=1}^{n} a_{ij} w_j\right) = \sum_{i=1}^{n} (Aw)_i .$$

Отже, щоб знайти $n_{\max}$ потрібно обчислити вектор-стовпець Aw, а потім додати його елементи.

Коефіцієнт узгодженості RI визначається, як середнє значення коефіцієнту CI для великої вибірки генерованих випадковим чином матриць порівняння A [52]. Якщо $CR \le 0.1$, то рівень неузгодженості матриці порівняння A є прийнятним [52]. Тоді дана матриця може бути використана для оцінки альтернатив. Якщо $CR > 0.1$, то рівень неузгодженості матриці порівняння A є високим. В цьому випадку, ОПР рекомендується перевірити елементи a_{ij} матриці A для одержання більш узгодженої матриці.

Якщо два n-вектори $a_i = (a_{ij})$ та $a_k = (a_{kj})$ колінеарні, то кут між ними $\alpha_{ik} = 0$. Отже, для таких векторів виконується умова [52, 53]:

$$\xi_{ik} = \cos\alpha_{ik} = \frac{a_i \cdot a_k}{|a_i| \cdot |a_k|} = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij} a_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^{n} a_{kj}^2}} = 1 .$$

Дану умову також можна використати для перевірки узгодженості матриці парних порівнянь: якщо побудувати матрицю $\Xi = (\xi_{ik})_{n\times n}$, елементами якої є косинуси кутів між n-векторами $a_i = (a_{ij})$ та $a_k = (a_{kj})$, то її елементи $\xi_{ik} \approx 1$ вказують на узгоджені оцінки, а інші елементи – відповідають неузгодженим оцінкам, які потрібно уточнити.

Матриця A_2 у прикладі 3 є неузгодженою, оскільки стовпці відповідної нормалізованої матриці N_2 не однакові. Щоб оцінити узгодженість матриці A_2, обчислимо значення $n_{\max}$. З розглянутого вище маємо середні значення оцінок: $\overline{w}_1 = p_{21} = 0.129, \overline{w}_2 = p_{22} = 0.277, \overline{w}_3 = p_{23} = 0.594$.

Відповідно, $A_2 w = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{5} \\ 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 5 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.129 \\ 0.277 \\ 0.594 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.3863 \\ 0.8320 \\ 1.7930 \end{pmatrix}$.

Звідси одержимо: $n_{\max} = 0.3863 + 0.8320 + 1.7930 = 3.0113$.

Отже, для $n = 3$ маємо:

$$CI = \frac{n_{\max} - n}{n-1} = \frac{3.0113 - 3}{3-1} = 0.00565,\ RI = \frac{1.98(n-2)}{n} = \frac{1.98(3-2)}{3} = 0.66$$

$$CR = \frac{0.00565}{0.66} \approx 0.009$$

Оскільки $CR < 0.1$, рівень неузгодженості матриці A_2 є прийнятним.

Використання розглянутої вище теорії ілюструє наступний розрахунок.

Приклад 4. Нехай ОПР X має зробити раціональний вибір з трьох альтернатив А1, А2 і А3 на основі трьох критеріїв К1, К2 і К3.

Порівняльні оцінки критеріїв представлені матрицею А: $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{2} & 1 & \frac{1}{5} \\ 4 & 5 & 1 \end{pmatrix}$.

Порівняльні оцінки альтернатив А1, А2 і А3 за критеріями К1, К2 і К3 представлені матрицями:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{4} & 5 & 1 \end{pmatrix},\ A_2 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 2 \\ 3 & 1 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 2 & 1 \end{pmatrix},\ A_3 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 1 \\ 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Ієрархічна схема задачі представлена на малюнку (рис. 5).

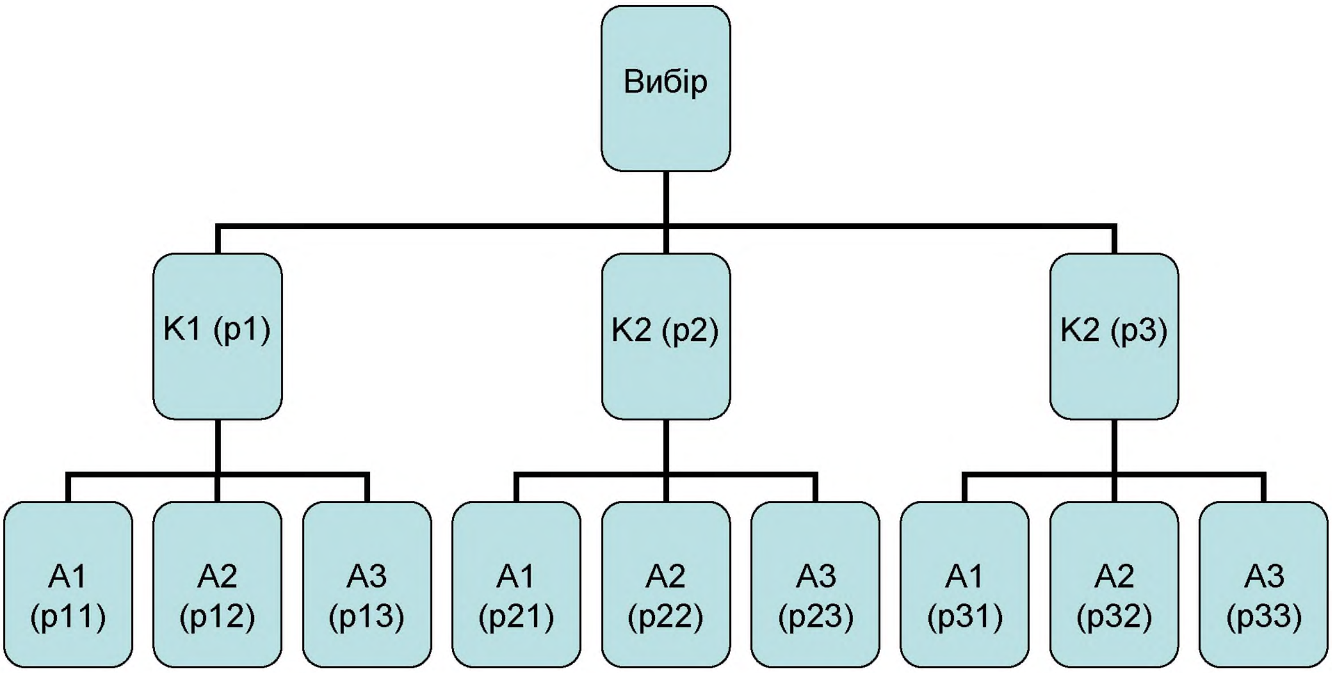

Рис. 5. Ієрархічна схема прикладу 4.

Щоб обґрунтувати, яку з трьох альтернатив має обрати X, потрібно розрахувати матрицю КВК альтернатив за формулою: $\Omega = w \cdot P$, де: $w = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \end{pmatrix}$ – вектор вагових коефіцієнтів критеріїв, за якими оцінюються альтернативи; $P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}$ – матриця оцінок трьох альтернатив (стовпці) за трьома критеріями (рядки).

Спочатку знайдемо ваги критеріїв w_1, w_2, w_3 ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$). Для цього: нормалізуємо матрицю порівнянь критеріїв A, поділивши її стовпці на суму їх елементів, і знайдемо середні значення по рядках.

Для матриці A сума елементів її стовпців рівна, відповідно, $(5.5, 8, 1.45)$. Тоді одержимо:

$$N = \begin{pmatrix} 0.182 & 0.250 & 0.172 \\ 0.091 & 0.125 & 0.138 \\ 0.727 & 0.625 & 0.690 \end{pmatrix}, \quad \begin{aligned} w_1 &= (0.182 + 0.250 + 0.172)/3 = 0.201 \\ w_2 &= (0.091 + 0.125 + 0.138)/3 = 0.118 \\ w_3 &= (0.727 + 0.625 + 0.690)/3 = 0.681 \end{aligned}$$

Отже, $w = \begin{pmatrix} 0.201 & 0.118 & 0.681 \end{pmatrix}$.

Аналогічно, знайдемо відносні оцінки альтернатив по кожному критерію (рис. 6).

Матриця парних порівнянь A1			Нормалізована матриця N1			Ваги альтернатив за критерієм 1	
1	3	4	0,632	0,333	0,769	**0,578**	p11
1/3	1	1/5	0,211	0,111	0,038	**0,120**	p12
1/4	5	1	0,158	0,556	0,192	**0,302**	p13
1,58	9,00	5,20				1,000	
Матриця парних порівнянь A2			**Нормалізована матриця N2**			**Ваги альтернатив за критерієм 2**	
1	1/3	2	0,222	0,100	0,571	**0,298**	p21
3	1	1/2	0,667	0,300	0,143	**0,370**	p22
1/2	2	1	0,111	0,600	0,286	**0,332**	p23
4,50	3,33	3,50				1,000	
Матриця парних порівнянь A3			**Нормалізована матриця N3**			**Ваги альтернатив за критерієм 3**	
1	1/2	1	0,250	0,143	0,400	**0,264**	p31
2	1	1/2	0,500	0,286	0,200	**0,329**	p32
1	2	1	0,250	0,571	0,400	**0,407**	p33
4,00	3,50	2,50				1,000	

Рис. 6. Розрахунок матриць парних порівнянь трьох альтернатив за трьома критеріями (розрахунки виконані в електронних таблицях Excel).

Таким чином, одержимо:

	0,578	0,120	0,302
P=	0,298	0,370	0,332
	0,264	0,329	0,407

Тоді, $\Omega = w \cdot P = \begin{pmatrix} 0.201 & 0.118 & 0.681 \end{pmatrix} \cdot P =$

W=	0,331	0,292	0,377

Отже, найкращу оцінку за даними критеріями має альтернатива A3.

У даному випадку усі чотири матриці парних порівнянь A, A_1, A_2 і A_3 не є ідеально узгодженими, оскільки їх стовпці не однакові (у кожній матриці окремо). Щоб оцінити узгодженість матриць розрахуємо для кожної з них коефіцієнт узгодженості $CR = \dfrac{CI}{RI}$.

Значення $n_{\max}$ для оцінки узгодженості матриць A, A_1, A_2 і A_3 знайдемо наступним чином:

(а) утворимо вектори-стовпці w, w_1, w_2, w_3 із середніх значень по рядкам нормалізованих матриць N, N_1, N_2, N_3, відповідно. Одержимо:

Нормалізована матриця N			Вектор w	Нормалізована матриця N2			Вектор w2
0,182	0,250	0,172	0,201	0,222	0,100	0,571	0,298
0,091	0,125	0,138	0,118	0,667	0,300	0,143	0,370
0,727	0,625	0,690	0,681	0,111	0,600	0,286	0,332

Нормалізована матриця N1			Вектор w1	Нормалізована матриця N3			Вектор w3
0,632	0,333	0,769	0,578	0,250	0,143	0,400	0,264
0,211	0,111	0,038	0,120	0,500	0,286	0,200	0,329
0,158	0,556	0,192	0,302	0,250	0,571	0,400	0,407

(б) Знайдемо добутки матриць Aw, A_1w_1, A_2w_2, A_3w_3, а потім суми їх елементів (це і будуть числа $n_{\max}$ для кожної матриці порівняння), відповідно одержимо:

A*w=	0,607	A1*w1=	2,145824	A2*w2=	1,08571	A3*w3=	0,835714
	0,355		0,373099		1,42963		1,060714
	2,076		1,046596		1,2209		1,328571
n_max=	3,038	n1_max=	3,566	n2_max=	3,736	n3_max=	3,225

(в) Виконаємо розрахунок $CI = \dfrac{n_{\max} - n}{n - 1}$ для всіх матриць порівняння:

	A	A1	A2	A3
CI=	0,019	0,283	0,368	0,113

(г) знайдемо $RI = \dfrac{1.98(n-2)}{n}$=0,66.

(д) Обчислимо $CR = \dfrac{CI}{RI}$ для всіх матриць порівняння:

	A	A1	A2	A3
CR=	0,029	0,428	0,558	0,170

Розрахунки показують, що матриця A є узгодженою (для неї CR<=0.1). Інші матриці порівняння не є узгодженими, отже їх елементи необхідно уточнити.

2.2 Аналітична модель процесу прийняття рішень методом аналізу ієрархій

Загальні принципи прийняття раціональних рішень на основі методу аналізу ієрархій розглядаються у роботі [52]. Розрахунковий підхід до прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій представлений у [70]. У даному розділі описана розгорнута математична модель процесу прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій, яка може бути використана, як обчислювальний алгоритм для роботи аналітичного модуля інформаційної системи підтримки прийняття рішень (ІСППР).

Розглянемо математичну модель процесу прийняття рішень на основі раціонального вибору з кількох наявних альтернатив для довільної кількості критеріїв. Вихідні параметри моделі:

- список альтернатив (можливі варіанти рішень) a_j, $j=\overline{2,n}$;
- критерії оцінки альтернатив c_i, $i=\overline{1,m}$;
- порівняльні оцінки вагомості критеріїв c_i представлені матрицею

$$C=\left(c_{ij}\right)_{m\times m}=\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mm} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 1 & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ \frac{1}{c_{12}} & 1 & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{c_{1m}} & \frac{1}{c_{2m}} & \cdots & 1 \end{pmatrix},\ c_{ii}=1,\ c_{ij}c_{ji}=1;$$

- порівняльні оцінки альтернатив за визначеними критеріями, представлені матрицями (відповідно до кількості критеріїв)

$$A_i=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}_i=\left(a_{kj}\right)_i=\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{pmatrix}_i, i=\overline{1,m},$$

$a_{ii}=1,\ a_{ij}a_{ji}=1.$

Розрахункові формули моделі, які представляють математичний алгоритм роботи аналітичного модуля:

$$N=\begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \cdots & w_{mm} \end{pmatrix}=\left(w_{ij}\right)_{m\times m},\ w_{ij}=\frac{c_{ij}}{s_j}, s_j=\sum_{i=1}^{m}c_{ij},\ j=\overline{1,m}$$

– розрахунок нормалізованої матриці порівняльних оцінок критеріїв;

$$w=\begin{pmatrix} w_1 & w_2 & \ldots & w_m \end{pmatrix}=\left(w_i\right)_{1\times m},\ w_i=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}w_{ij},\ i=\overline{1,m}$$

– розрахунок вектору вагових коефіцієнтів критеріїв;

$$N_i=\begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{pmatrix}_i=\left(w_{kj}\right)_i,\ w_{kj}=\frac{a_{kj}}{s_j}, s_j=\sum_{k=1}^{n}a_{kj},\ j=\overline{1,n},\ i=\overline{1,m}$$

– розрахунок нормалізованих матриць порівняльних оцінок альтернатив за даними критеріями;

$$P=\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{pmatrix}=\left(p_{ij}\right)_{m\times n},\ p_{ij}=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}w_{kj}$$

– розрахунок матриці вагових коефіцієнтів альтернатив за даними критеріями;

$$\Omega=w\cdot P=\left(\omega_j\right)_{1\times n},\ \omega_j=\sum_{i=1}^{m}w_ip_{ij}=w_1p_{1j}+w_2p_{2j}+\ldots+w_mp_{mj},\ j=\overline{1,n}$$

– підсумковий розрахунок вектору КВК альтернатив.

Прийняття рішення за критерієм: $\omega_i=\max\limits_j \omega_j \Rightarrow a_i$.

Дану математичну модель можна представити у більш компактному вигляді, як обчислювальний алгоритм, придатний для програмування [70]:

c_i, $i=\overline{1,m}$ – критерії оцінки альтернатив;

a_j, $j=\overline{2,n}$ – альтернативні рішення (альтернативи);

$C=\left(c_{ij}\right)_{m\times m}$, $c_{ii}=1$, $c_{ij}\cdot c_{ji}=1$ – матриця порівняльних оцінок критеріїв;

$N=\left(w_{ij}\right)_{m\times m}$, $w_{ij}=\dfrac{c_{ij}}{s_j}, s_j=\sum\limits_{i=1}^{m}c_{ij}$, $j=\overline{1,m}$ – нормалізована матриця оцінок критеріїв;

$w=\left(w_i\right)_{1\times m}$, $w_i=\dfrac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m}w_{ij}$, $i=\overline{1,m}$ – вектор вагових коефіцієнтів критеріїв;

$A_i=\left(\left(a_{kj}\right)_{n\times n}\right)_i$, $i=\overline{1,m}$, $a_{kk}=1$, $a_{kj}\cdot a_{jk}=1$, $k,j=\overline{1,n}$ – матриці порівняльних оцінок альтернатив за визначеними критеріями;

$N_i=\left(\left(w_{kj}\right)_{n\times n}\right)_i$, $w_{kj}=\dfrac{a_{kj}}{s_j}, s_j=\sum\limits_{k=1}^{n}a_{kj}$, $j=\overline{1,n}$, $i=\overline{1,m}$ – нормалізовані матриці порівняльних оцінок альтернатив;

$P=\left(p_{ij}\right)_{m\times n}$, $p_{ij}=\dfrac{1}{n}\sum\limits_{j=1}^{n}w_{kj}$ – матриця вагових коефіцієнтів альтернатив за даними критеріями;

$\Omega=w\cdot P=\left(\omega_j\right)_{1\times n}$, $\omega_j=\sum\limits_{i=1}^{m}w_i p_{ij}$, $j=\overline{1,n}$ – вектор комбінованих вагових коефіцієнтів альтернатив;

$\omega_i=\max\limits_{j}\omega_j\Rightarrow a_i$ – прийняття рішення за критерієм максимізації вагового коефіцієнта.

Висновки до розділу 2

У даному розділі розглянуті теоретичні основи математичного моделювання процесу прийняття рішень в умовах визначеності. Представлена розгорнута математична модель процесу прийняття рішень, побудована на основі математичних методів лінійної алгебри, зокрема, методів теорії числових матриць та багатовимірних векторів, а також методу аналізу ієрархій, відомого з математичної теорії прийняття рішень. Завдяки цьому набули подальшого розвитку теоретичні знання щодо математичного моделювання процесів прийняття рішень, зокрема, процесу прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій.

Представлена математична модель процесу прийняття рішень описує логіку й розрахунковий алгоритм процесу прийняття рішень в умовах визначеності. Вона може служити основою для побудови обчислювального алгоритму, який може бути використаний для програмної реалізації аналітичного модуля інформаційної системи підтримки прийняття рішень.

РОЗДІЛ 3
СИНТЕЗ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ТА ЇЇ АПРОБАЦІЯ

3.1 Алгоритмізація процесу прийняття рішень

Основні етапи процесу прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій (МАІ) представлені у роботі [70]. У даній роботі представлений узагальнений алгоритм процесу прийняття рішень на основі МАІ [52], згідно з яким процес прийняття рішення відбувається у декілька стадій, котрі складаються з послідовних етапів, результатом кожного з яких є відповідна активність ОПР: перехід до виконання наступного етапу, формування артефакту процесу або реакція на відгук інформаційної системи підтримки прийняття рішень.

Для описання алгоритму використана графічна нотація UML [2]: побудована поведінкова схема дій ОПР на основі МАІ, що описується UML-діаграмою послідовності (Sequence diagram) [3], представленою на малюнку (рис. 7).

UML-діагарама (рис. 7) описує алгоритм взаємодії ОПР та ІСППР у процесі з часом. Діаграма відображає повідомлення, що передаються між учасниками та об'єктами в системі, а також порядок, у якому вони зустрічаються. Зміст діаграми описує п'ять послідовних стадій взаємодії ОПР і ІСППР у ППР з на основі МАІ.

Перша стадія: формулювання проблєми, що потребує рішення. На цій стадії ОПР ознайомлюється з існуючою проблємою (Етап 1), усвідомлює необхідність прийняття рішення (Етап 2). Після цього ОПР звертається до ІСППР із формулюванням проблєми (Етап 3). ІСППР зберігає надане формулювання для подальшого використання. Результатом стадії є формулювання проблєми, яке зберігається в ІСПРР.

Друга стадія: визначення альтернатив рішення проблєми. На цій стадії ОПР на запит ІСППР проводить аналіз поставленої проблєми, формує список можливих варіантів вирішення проблєми (альтернатив) $A = \{A_i\}$, $i = \overline{1, n}$. Після цього повертає цей список до ІСППР, яка зберігає список з n альтернатив у масиві $A=\left(A_i\right)_{n\times1}$ (Етап 4).

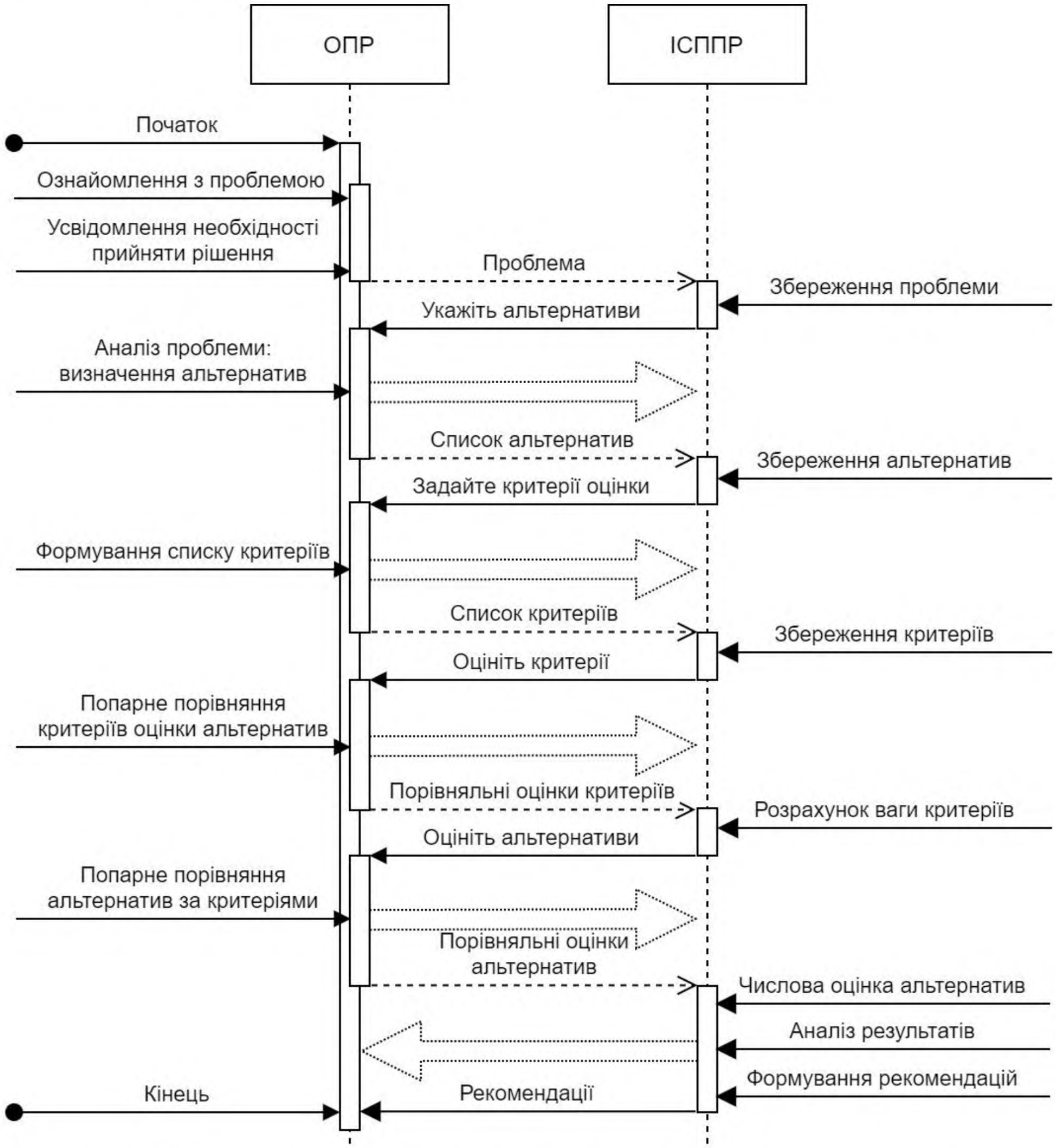

Рис. 7. Поведінкова схема (діаграма послідовності) алгоритму прийняття рішень методом аналізу ієрархій.

Третя стадія: визначення критеріїв для оцінювання альтернатив. ОПР на запит ІСППР, виходячи із власних уподобань формулює критерії для оцінювання представлених альтернатив $K=\left\{K_j\right\}$, $j=\overline{1,m}$, і повертає список визначених критеріїв до ІСППР (Етап 5). ІСППР зберігає список критеріїв у масиві. Результатом є масив з m критеріїв $K=\left(K_j\right)_{m\times 1}$, збережений у ІСПРР.

Четверта стадія: визначення вагомості критеріїв. ОПР на запит ІСППР здійснює оцінку критеріїв шляхом попарного порівняння критеріїв, оцінюючи їх відносну вагомість за порядковою шкалою, і повертає результати порівнянь до ІСППР (Етап 6). За результатами цих порівнянь ІСПРР розраховує вагові коефіцієнти критеріїв [4] (Етап 7). В результаті формується масив вагових коефіцієнтів критеріїв $w=\left(w_j\right)_{1\,x\,m}$, $\sum_{j=1}^{m} w_j=1$.

П'ята стадія: числова оцінка альтернатив, формування рекомендацій. ОПР на запит ІСППР здійснює оцінку всіх альтернатив A за кожним із визначених критеріїв K шляхом попарного порівняння альтернатив, і повертає результати цих порівнянь до ІСППР (Етап 8). За результатами порівнянь ІСПРР розраховує комбіновані оцінки альтернатив з урахуванням ваги використаних критеріїв [70] (Етап 9). Результатом буде формування матриці комбінованих оцінок альтернатив $P=\left(p_{ij}\right)_{m\,x\,n}$, $\sum_{j=1}^{n} p_{ij}=1$, $i=\overline{1,m}$. Далі ІСППР виконує аналіз отриманих результатів, визначає оптимальну альтернативу, і повертає ОПР рекомендації щодо прийняття оптимального рішення (Етап 10). Кінцевим результатом буде рекомендація щодо вибору найкращої альтернативи вирішення проблєми.

3.2 Схема обчислювального алгоритму

Обчислювальний алгоритм аналітичного модуля ІСППР побудований наступним чином.

На початку користувач уводить вихідні дані: перелік альтернативних варіантів рішення (текст) a_j, $j=\overline{2,n}$; критерії оцінювання альтернатив (текст) c_i, $i=\overline{1,m}$. Подальші дії представлені наступними кроками.

Крок 1. Визначення вагових коефіцієнтів критеріїв. (а) З урахуванням уподобань ОПР формується матриця парних порівнянь критеріїв – програма опитує ОПР стосовно важливості критеріїв: на підставі цього розраховується квадратна матриця C розміром $m \times m$ (відповідно до кількості критеріїв m):

$$C = \left(c_{ij}\right)_{m\times m} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ \dfrac{1}{c_{12}} & 1 & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dfrac{1}{c_{1m}} & \dfrac{1}{c_{2m}} & \cdots & 1 \end{pmatrix}.$$

Розрахунок елементів матриці C та забезпечення її узгодженості, а також інтерпретація були розглянуті вище.

(б) Для обчислення відносної ваги критеріїв автоматично утворюється відповідна нормалізована матриця N розміру $m \times m$:

$$N = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1m} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \cdots & w_{mm} \end{pmatrix} = \left(w_{ij}\right)_{m\times m}, \text{ де } w_{ij} = \frac{c_{ij}}{s_j}, s_j = \sum_{i=1}^{m} c_{ij}, \ j = \overline{1,m};$$

$\sum\limits_{i=1}^{m} w_{ij} = 1, \quad j = \overline{1,m}; \quad \sum\limits_{i=1}^{m}\sum\limits_{j=1}^{m} w_{ij} = m$ або $\dfrac{1}{m}\sum\limits_{i=1}^{m}\sum\limits_{j=1}^{m} w_{ij} = 1$. Алгоритм розрахунку нормалізованої матриці представлений вище. Розраховуються вагові коефіцієнти для кожного критерію $c_i : w_i = \dfrac{1}{m}\sum\limits_{j=1}^{m} w_{ij}, \ \ i = \overline{1,m}, \ \ \sum\limits_{i=1}^{m} w_i = 1$. Формується вектор вагових коефіцієнтів критеріїв:

$$w = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & \ldots & w_m \end{pmatrix} = \left(w_i\right)_{1\times m}, i = \overline{1,m}; \ \sum_{i=1}^{m} w_i = 1.$$

Крок 2. Розрахунок числових оцінок альтернатив за даними критеріями. (а) Для попарної порівняльної оцінки альтернатив a_j, $j = \overline{1,n}$ за критеріями c_i, $i = \overline{1,m}$ формується m квадратних матриць парних порівнянь A_i, $i = \overline{1,m}$

(відповідно до кількості критеріїв) розміру $n \times n$ (відповідно до кількості альтернатив):

$$A_i = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}_i = \left(a_{kj}\right)_i = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{pmatrix}_i, \; i = \overline{1,m}$$

Інтерпретація елементів матриць A_i, їх розрахунок та забезпечення узгодженості розглядаються вище.

(б) Для обчислення порівняльних оцінок альтернатив за кожним критерієм, на основі матриць парних порівнянь A_i розраховуються відповідні нормалізовані матриці:

$$N_i = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{pmatrix}_i = \left(w_{kj}\right)_i, \text{ де } w_{kj} = \frac{a_{kj}}{s_j}, s_j = \sum_{k=1}^{n} a_{kj}, \; j = \overline{1,n}, \; i = \overline{1,m};$$

$\sum_{k=1}^{n} w_{kj} = 1$, $j = \overline{1,n}$. Крім того, $\sum_{k=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij} = n$ або $\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} w_{ij} = 1$. Оцінки альтернатив a_j, $i = \overline{1,n}$ за критеріями c_i, $i = \overline{1,m}$ знаходимо, як $p_{ij} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} w_{kj}$, $i = \overline{1,m}$, $\sum_{i=1}^{m} p_{ij} = 1$, $i = \overline{1,n}$. Таким чином, одержуємо матрицю $P = \left(p_{ij}\right)_{m \times n}$ порівняльних оцінок альтернатив a_j, $j = \overline{1,n}$ (стовпці) за критеріями c_i, $i = \overline{1,m}$ (рядки):

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{pmatrix} = \left(p_{ij}\right)_{m \times n}, \text{ де } \sum_{j=1}^{n} p_{ij} = 1, \; j = \overline{1,m}.$$

Крок 3. Розрахунок підсумкових числових оцінок альтернатив. Щоб визначити, яка альтернатива є найкращою, розраховується матриця КВК альтернатив $\Omega = w \cdot P$. Тобто,

$$\Omega = w \cdot P = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & \dots & w_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \dots & \omega_n \end{pmatrix} = \left(\omega_j\right)_{1\times n}$$

Елементами матриці $\Omega = \left(\omega_j\right)_{1\times n}$ є КВК альтернатив які розраховуються за формулою $\omega_j = \sum_{i=1}^{m} w_i p_{ij} = w_1 p_{1j} + w_2 p_{2j} + \ldots + w_m p_{mj}$, $j = \overline{1,n}$.

Крок 4. Визначення кращої альтернативи. Найкращою альтернативою вважається та, що має найбільший комбінований ваговий коефіцієнт: $\omega_i = \max_j \omega_j \Rightarrow a_i$.

На малюнку (рис. 8) представлена блок-схема алгоритму ППР, реалізованого в аналітичному модулі ІСППР.

Логіка програми включає блок вводу даних, розрахунковий блок (блок виконання розрахунків), блок прийняття рішення (на основі обчислень) та блок виводу результату.

Блок вводу даних реалізований у вигляді двох циклів: цикл для вводу критеріїв c_i, $i = \overline{1,m}$ та цикл для вводу альтернатив вибору (найменувань закладів освіти) a_j, $j = \overline{2,n}$. Відповідні дані зберігаються у масивах з текстовими елементами $\left(c_i\right)_{1\times m}$, $i = \overline{1,m}$ та $\left(a_j\right)_{1\times n}$, $j = \overline{2,n}$, відповідно. У кожному циклі передбачене налаштування порівняльних оцінок критеріїв, що зберігаються у матриці $C = \left(c_{ij}\right)_{m\times m}$, та порівняльних оцінок альтернатив на основі обраних критеріїв, що зберігаються у матриці $A_i = \left(\left(a_{kj}\right)_{n\times n}\right)_i$. Дані оцінки вводяться особою, яка приймає рішення (користувачем) через інтерфейс програми. Вони відображають індивідуальні уподобання ОПР, тобто її особисту думку, стосовно критеріїв відбору та оцінок даних альтернатив на основі визначених критеріїв.

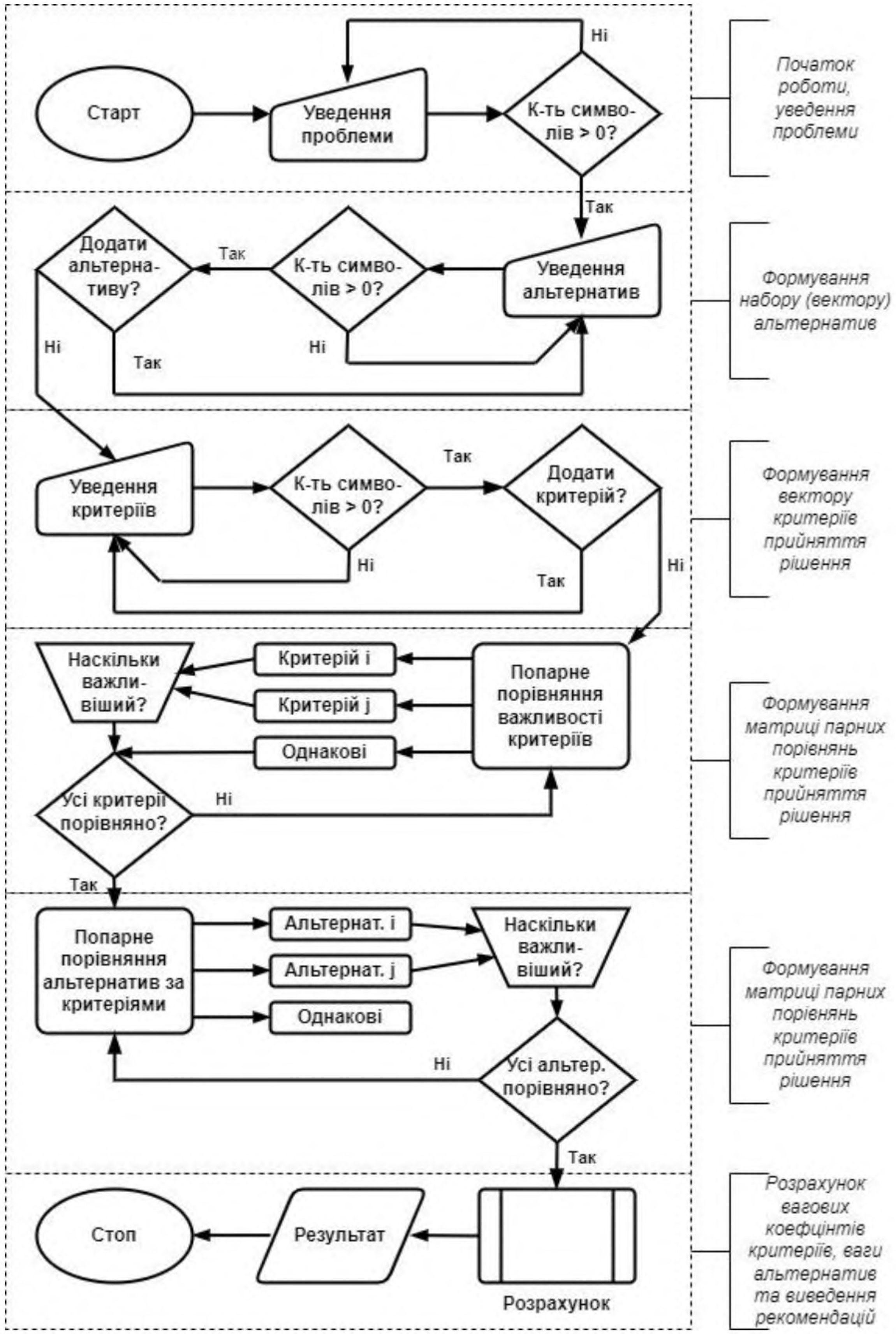

Рис. 8. Блок-схема аналітичного модуля ІСППР.

У розрахунковому блоці порівняльні оцінки, отримані у попередньому блоці, використовуються для розрахунку КВК альтернатив. Спочатку, за даними матриці $C=\left(c_{ij}\right)_{m\times m}$ розраховується нормалізована матриця $N=\left(w_{ij}\right)_{m\times m}$ та вектор вагових коефіцієнтів критеріїв $w=\left(w_i\right)_{1\times m}$. Потім, за даними матриць $A_i=\left(\left(a_{kj}\right)_{n\times n}\right)_i$ розраховуються нормалізовані матриці $N_i=\left(\left(w_{kj}\right)_{n\times n}\right)_i$ та матриця вагових коефіцієнтів альтернатив $P=\left(p_{ij}\right)_{m\times n}$. Після цього, виконується розрахунок комбінованих вагових коефіцієнтів альтернатив $\Omega=\left(\omega_j\right)_{1\times n}$. Для розрахунків використовуються формули, наведені у попередньому пункті та стандартні математичні операції з матрицями.

У блоці прийняття рішення шляхом перебору у циклі елементів матриці $\Omega=\left(\omega_j\right)_{1\times n}, j=\overline{2,n}$, та їх попарного порівняння, визначається $\max_j \omega_j$ – максимальний елемент матриці Ω, а також індекс j цього елементу. За індексом обирається рішення – елемент a_j, $j=\overline{2,n}$.

У блоці виводу результатів виводиться результат, що формулюється на основі шаблону з підстановкою у цей шаблон значення альтернативи a_i, що за результатами розрахунків, отримала максимальний комбінований ваговий коефіцієнт: $\omega_i=\max_j \omega_j \Rightarrow a_i$.

3.3 Технології реалізації проєкту

Дана розробка не передбачає збереження результатів роботи для їх повторного використання. Тому вона була реалізована, як браузерний застосунок, з використанням технологій програмування на боці клієнта. Для написання програми були використані наступні технології та мови програмування: HTML – мова гіпертекстової розмітки, версія 5.3 [76, 77, 78, 79, 80] – для розмітки інтерфейсу застосунку, CSS – каскадні таблиці стилю, версія 3 [81, 82, 83, 84, 85] – для форматування інтерфейсу застосунку, мова програмування браузерних додатків на боці користувача JavaScript (ECMAScript 2022) [86, 87, 88, 89] – для програмування динамічних елементів інтерфейсу та виконання необхідних математичних розрахунків математичних розрахунків, Ajax – технологія асинхронного завантаження коду для швидкого обміну даними із віддаленим вебсервером (внаслідок цього під час використання програми у браузері не працює кнопка «Назад», оскільки URL вебсторінки не змінюється) [96]; JQuery – технологія повторного використання коду [90, 91, 92, 93, 94, 95] – для графічного подання результатів розрахунку у вигляді діаграми; це багатофункціональна бібліотека JavaScript, використання якої спрощує обхід HTML-документів, маніпуляції з HTML-елементами, обробку подій та анімацію, використання технологій Ajax.

Для написання програмного коду був використаний вільний редактор вихідного коду Visual Studio Code [97]. Для збереження і контролю версій у процесі розробки використовувався локальний варіант системи контролю версій Git [98, 99].

3.4 Програмна реалізація аналітичного модуля

Відповідно до представленого алгоритму розроблена комп'ютерна програма – система підтримки прийняття рішення «Асистент-Помічник». Дана програма є браузерним застосунком, і може бути розміщена у вільному доступі в мережі Інтернет. Файлова структура проєкту представлена на малюнку (рис. 9).

Основний (індексний) файл index.html (розробка автора), розміщений у кореневій директорії проєкту. Він містить чистий (plain) HTML-код, і служить для інтеграції, забезпечення спільної роботи всіх інших компонентів проєкту.

Директорія images/ містить зображення логотипу програми logo.png [100]. У директорії css/ знаходиться файл main.css із CSS-кодом зовнішніх каскадних таблиць стилю (розробка автора), який описує відображення елементів інтерфейсу програми. Директорія js/ зберігає файли скриптів на мові JavaScript, які забезпечують реалізацію основних механізмів застосунку: функції управління застосунком та виконання аналітичних розрахунків згідно побудованої вище математичної моделі методу аналізу ієрархій – файл main.js (розробка автора), а також допоміжні механізми Ajax для динамічної маніпуляції елементами інтерфейсу за стосунку та повторного використання коду, якій використовується, зокрема, для відображення кругової діаграми при виводі результатів аналізу альтернативних рішень – файли jquery.min.js [101] та canvasjs.min.js [102], які належать стороннім розробникам.

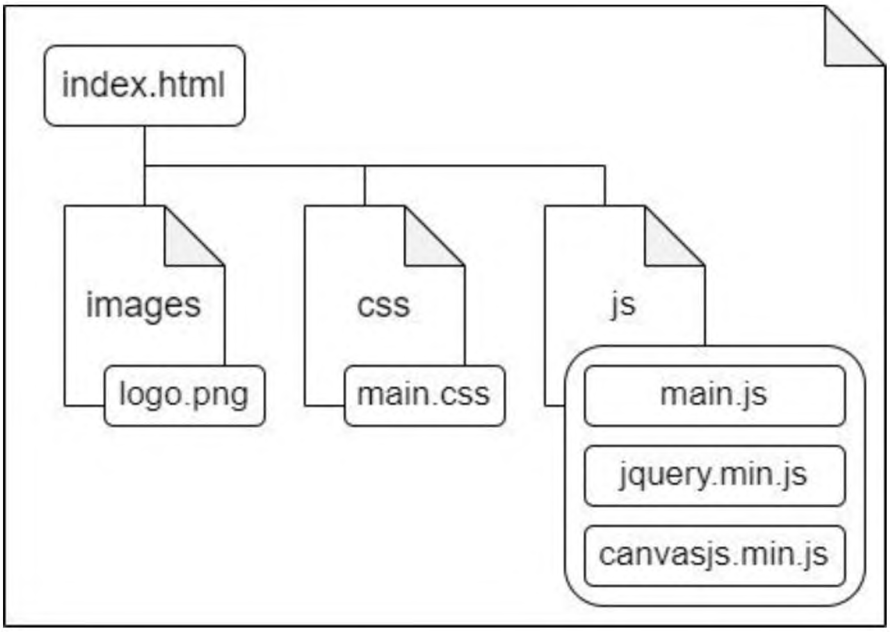

Рис. 9. Файлова структура проєкту Асистент-Порадник.

Код індексного файлу проєкту index.html представлений на рис. 10.

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
	<meta charset="UTF-8">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-
scale=1.0">
<title>Асистент-Порадник - допомагає прийняти рішення</title>
	<link href="css/main.css" rel="stylesheet" type="text/css">
<script
src="https://ajax.googleapis.com/ajax/libs/jquery/3.5.1/jquery.min.js">
</script>
	<!-- <script src="js/offline-jquery.min.js"></script> -->
	<script src="js/main.js"></script>
```

```
</head>
<body>
        <div class="container"></div>
</body>
<script
src="https://canvasjs.com/assets/script/canvasjs.min.js"></script>
<!-- <script src="js/offline-canvasjs.min.js"></script> -->
</html>
```

Рис. 10. Код основного файлу index.html програми Асистент-Порадник.

Програмні коди файлів main.css та main.js наведені у Додатках А та Б.

Спосіб користування програмою є інтуїтивним:

1. Запуск програми у браузері.

2. Уведення альтернатив вибору (сформулюйте довільним чином альтернативні рішення, серед яких Ви обираєте).

3. Уведення критеріїв оцінки альтернатив (сформулюйте довільним чином, на що Ви звертаєте увагу або що вважаєте важливим при виборі тієї чи іншої альтернативи).

4. Налаштування порівняльних оцінок для розрахунку ваги критеріїв (використовуючи інтерфейс програми, укажіть, які критерії є більш важливими порівняно з іншими критеріями).

5. Налаштування порівняльних оцінок ваги альтернатив за обраними критеріями (використовуючи інтерфейс програми, укажіть, які альтернативи є кращими, порівняно з іншими альтернативами, за кожними критерієм окремо).

6. Отримання результату: програма автоматично виконає розрахунок і виведе результат – рекомендацію, що є для Вас найкращою альтернативою за даними критеріями.

7. Завершення роботи з програмою. Результати роботи програми не зберігаються

Елементи інтерфейсу програми, реалізованого у вигляді лінійної послідовності діалогових вікон, представлені на малюнках (рис. 11-14).

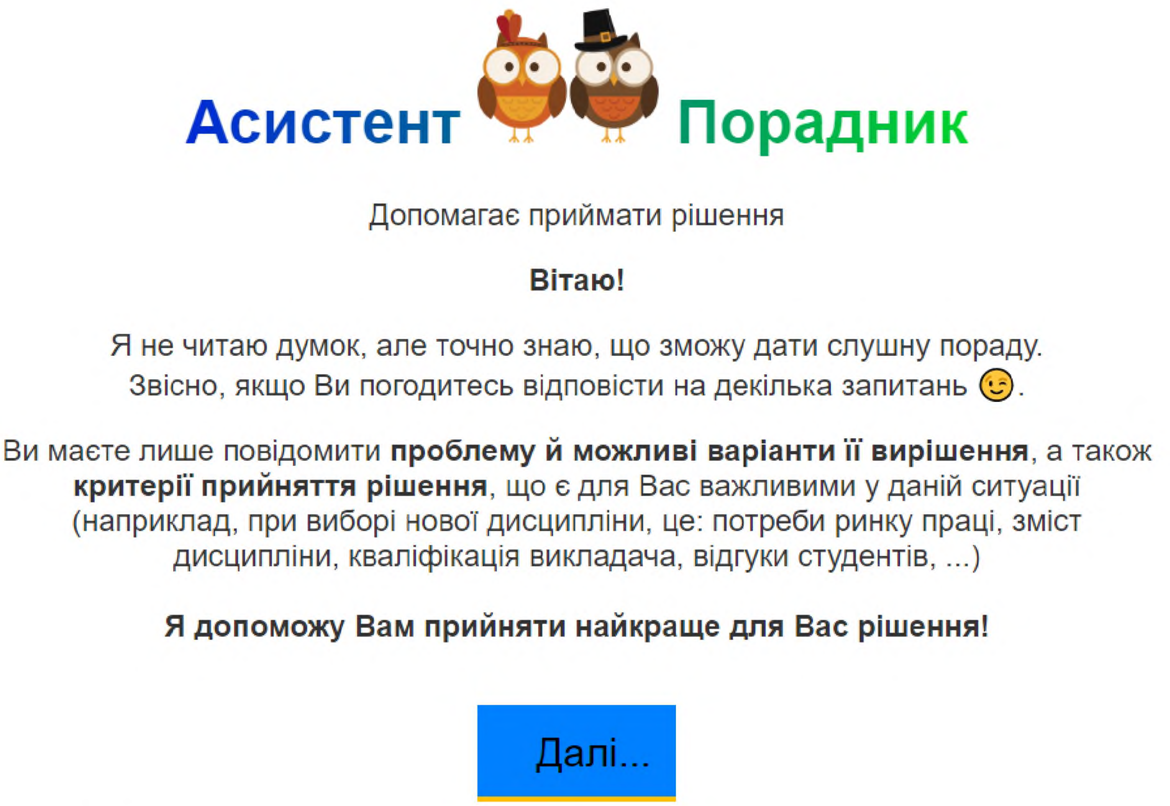

Рис. 11. Головний екран програмного засобу підтримки прийняття рішень Асистент-Порадник.

Рис. 12. Порівняльний аналіз важливості критеріїв.

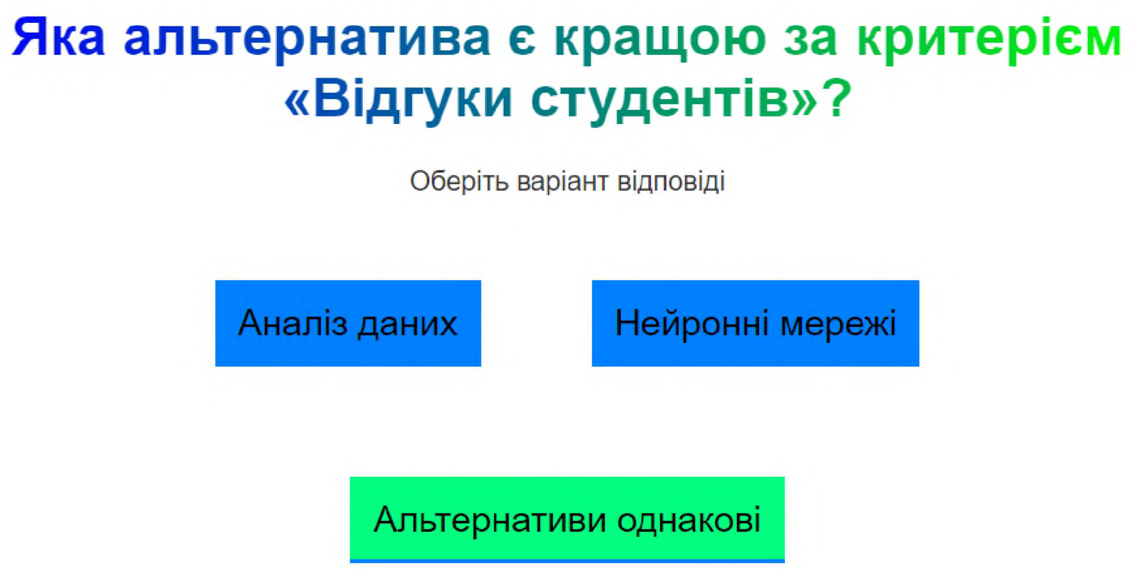

Рис. 13. Порівняльний аналіз альтернатив.

Рис. 14. Результат роботи програми програмного засобу – виведення рекомендацій

3.5 Економічна оцінка проєкту

Розрізняють прямий та непрямий види економічної ефективності використання ІС. Використання ІСППР чинить прямий вплив на підвищення рівня управління та поліпшення діяльності об'єкта через зниження витрат. Прямий ефект відбивається у результативних показниках діяльності та може бути виражений в натуральних, вартісних, трудових показниках (кількість вивільнених працівників управління, економія робочого часу в людино-годинах, економія фонду заробітної плати, продуктивність праці управлінських працівників тощо). Непрямий ефект відбивається у показниках виробничої господарської діяльності завдяки використанню більш якісної інформації, але важко піддається безпосередньому кількісному виміру [65].

Оцінка економічної ефективності даного проєкту може бути виражена через економію робочого часу в людино-годинах або у грошовому вимірі, будучи проведена відносно базисного рівня, за який можна прийняти «інтуїтивний» спосіб прийняття рішень.

Для оцінки економічної ефективності проєкту було запропоновано кільком дорослим особам скористатись розробленою програмою. Учасники експерименту отримали формулювання кількох проблєм нижчого, середнього та вищого рівнів складності, що потребують прийняття рішень. Складність проблєми визначається кількістю альтернатив та критеріїв вибору. Спочатку учасники мали провести аналіз: визначити варіанти альтернативних рішень проблєми, сформулювати критерії вибору альтернатив, а потім обрати найкращий на їх думку варіант рішення. Після цього вони мали зробити аналогічний вибір з комп'ютерною підтримкою. Результати інтуїтивного та раціонального вибору співпали у 60% випадків. При цьому, результати раціонального вибору були визнані більшістю учасників досліду (понад 90%), як більш обґрунтовані та прийнятні для них, ніж їх інтуїтивний вибір.

Середній час, витрачений на прийняття інтуїтивного рішення, та прийняття рішення з комп'ютерною підтримкою становив у середньому, відповідно 100% і

37%. Як з'ясувалось у даному експерименті, різниця у часі прийняття рішення суттєво залежала від рівня складності проблєми.

Для відносно простих проблем різниця у часі прийняття рішень була не дуже великою: 100% та 63%, відповідно, тобто виграш у часі становив у середньому 37%. Для проблєм середнього рівня складності: 100% та 52%, відповідно, тобто виграш у часі становив 48%. Для найбільш складних проблєм ця різниця була більш вагомою: 100% і 11%, виграш у часі становив 89%.

У таблиці 2 розраховані емпіричні коефіцієнти, що характеризують витрати часу на прийняття рішень у ситуаціях різного рівня складності.

Таблиця 2. Емпіричні коефіцієнти витрат часу

Рівень складності проблєми	Час прийняття рішення (відносно базового рівня)		
	Інтуїтивно (базовий рівень)	З комп'ютерною підтримкою	Економія часу
Низький	1	0,63	0,47
Середній	1	0,52	0,48
Високий	1	0,11	0,89

Використовуючи дані таблиці 1, можна оцінити економічну ефективність використання запропонованого проєкту, виходячи з наступних міркувань. Рішення низького рівня складності вирішуються, як правило, на нижчому рівні організаційної структури управління, проблєми середнього рівня – на середньому рівні, високого рівня – на найвищому рівні. При цьому, припустимо, що власне на прийняття рішень працівники нижчого рівня використовують до 20% робочого часу, працівники середнього рівня – 40% часу, працівники вищого рівня – 70% часу. Тоді, можна розрахувати відносні та абсолютні витрати часу на прийняття рішень для працівників різних рівнів управління. Відносні витрати часу представлені в таблиці 3.

Таким чином, за рахунок використання комп'ютерної підтримки прийняття рішень, працівники на нижчому рівні управління можуть зекономити до 7,4%

робочого часу, на середньому рівні – до 19, 2% робочого часу, на вищому рівні – до 62, 3%.

Таблиця 3. Відносні втрати часу на прийняття рішень

Рівні управління	Витрати часу на прийняття рішень (відносно базового рівня)		
	Інтуїтивно (базовий рівень)	З комп'ютерною підтримкою	Економія часу
Низький	0,2	0,126	0,074
Середній	0,4	0,208	0,192
Високий	0,7	0,077	0,623

Річна норма робочого часу при 5-денному 40-годинному робочому тижні у 2022 році становить 1987 годин [103]. Абсолютна економія робочого часу за рахунок використання даного проєкту представлена у таблиці 4.

Таблиця 4. Абсолютні витрати часу на прийняття рішень

Рівні управління	Витрати часу на прийняття рішень, люд.-год./рік		
	Інтуїтивно (базовий рівень)	З комп'ютерною підтримкою	Економія часу
Низький	397	250	147
Середній	795	556	239
Високий	1391	153	1238

У таблиці 4 представлені відомості щодо середньої заробітної плати працівників нижчої, середньої та найвищої ланок системи управління в Україні у 2022 році.

За даними моніторингу оплати праці у 2020 році [104], проведеному Національним агентством України з питань державної служби, для державних службовців категорії «А1» він становив: 1 рівень – 131513 грн./рік, 2 рівень – 97820 грн./рік, 3 рівень – 75729 грн./рік.

У таблиці 5 представлена грошова оцінка витрат на безпосереднє прийняття рішень державними службовцями категорії «А1» у 2020 році.

Таблиця 5. Грошова оцінка витрат на прийняття рішень

Категорія «А» Рівні управління	Грошові витрати на прийняття рішень, грн./рік		
	Інтуїтивно (базовий рівень)	З комп'ютерною підтримкою	Економія коштів
3 рівень	15145	9542	5603
2 рівень	39128	20346	18728
1 рівень	92059	10127	81932

Таким, чином можна зробити висновок, що використання результатів даної розробки найбільш доцільне у першу чергу для працівників найвищого рівня управління.

Висновки до розділу 3

У даному розділі описаний загальний алгоритм процесу прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій, представлений UML-діаграмою послідовності. Таким чином, набули подальшого розвитку теоретичні знання щодо алгоритмізації процесів прийняття рішень, зокрема, процесу прийняття рішень на основі методу аналізу ієрархій. Представлена поведінкова схема є теоретичною основою для побудови моделі аналітичного модуля інформаційної системи підтримки прийняття рішень, а також для програмної реалізації цього алгоритму на основі даної моделі. На основі даної діаграми розроблена блок-схема обчислювального алгоритму аналітичного модуля ІСППР.

Стек технологій програмування для програмної реалізації математичної моделі ППР на основі МАІ, покладеної в основу алгоритму роботи аналітичного модуля ІСППР, включає технологій програмування на боці клієнта: HTML, CSS, JavaScript, JQuery, Ajax. Для написання коду використовувався редактор коду Visual Studio Code, для контролю версій – система контролю версій Git.

Програмна реалізація проєкту у вигляді браузерного застосунку, його інтерфейс та алгоритм використання описані у пункті 3.4. Основний програмний код представлений у Додатках.

Економічна оцінка ефективності проєкту (п. 3.5) дозволяє зробити висновок, що використання результатів даної розробки найбільш доцільне у першу чергу для працівників найвищого рівня управління.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи встановлена доцільність математичного описання процедури процесу прийняття рішень за моделлю, що пропонується. Показано, що математична модель, побудована на основі методу аналізу ієрархій, дозволяє зробити обґрунтований (раціональний) вибір з кількох наявних альтернатив. Зроблено висновок про те, що процедура прийняття раціонального рішення за допомогою створеного аналітичного модуля ІСППР дозволяє більш свідомо приймати відповідні рішення, а також має позитивну економічну оцінку.

Основні результати роботи. На основі методу аналізу ієрархій побудована математична модель прийняття рішення щодо вибору закладу вищої освіти на основі довільної кількості критеріїв, визначених особою, яка приймає рішення; розроблений алгоритм комп’ютерної реалізації даної моделі та створена комп’ютерна програма, що дозволяє автоматизувати процес прийняття рішення щодо вибору закладу вищої освіти з урахуванням уподобань особи, яка приймає рішення.

Наукова новизна роботи: на відміну від існуючих на практиці процедур, запропоновано формальний алгоритм процесу прийняття рішень та варіант її прогрманої реалізації, що використовує математичну модель прийняття рішення в умовах визначеності; розобка дозволяє в інтерактивному режимі одержати числові оцінки довільної кількості альтернативних рішень.

Основними **результатами** роботи є:

– побудова математичної моделі процесу раціонального прийняття рішень в умовах визначеності;

– програмна реалізація аналітичного модуля інформаційної системи підтримки прийняття рішень.

Практичне значення. Результати роботи можуть бути використані для прийняття рішень на основі критеріїв, визначених особисто користувачем, які відображають його власні інтереси й уподобання; для проведення подальших досліджень у напрямку математичного моделювання процесу прийняття рішень.